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"

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Кожухов А.А.

Старый Оскол – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6

1. ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛОСНИКОВ И УСЛОВИЙ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ, АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРОРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВ 11

1.1 Характеристика детали 11

1.2 Основные параметры колосников 16

1.3 Условия эксплуатации 19

1.4 Особенности эксплуатации отливки 21

1.4.1 Влияние атмосферы обжиговой машины на ресурс колосников 21

1.4.2 Влияние температурного режима обжиговой машины эксплуатационные свойства колосников 24

1.4.3 Влияние параметров эксплуатации обжиговой машины на ресурс колосников обжиговых тележек 28

1.4.4 Влияние качества обжигаемого сырья на стойкость колосников обжиговых тележек 30

1.5 Анализ аналогов 32

1.5.1 Анализ сталей и сплавов, используемых на отечественных производствах. 32

1.5.2 Анализ зарубежных аналогов 36

1.5.3 Анализ сталей и сплавов из литературных источников 38

1.6 Технология выплавки стали 40Х24Н12СЛ 53

1.7 Технология литья колосников из стали 40Х24Н12СЛ 60

1.8 Выводы 68

2. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛОСНИКОВ ПРЕЖДЕВРЕМЕННО ВЫШЕДШИХ ИЗ СТРОЯ 71

2.1 Испытания колосников, изготовленных по ГОСТ 977-88 от различных производителей 71

2.2 Исследование причин преждевременного выхода из строя колосников во время эксплуатации 78

2.3 Статистический анализ причин выхода из строя литых колосников обжиговых тележек 83

2.4 Исследование колосников для определения причин излома замковой части87

2.5 Исследование колосников для определения причин коробления 90

2.6 Исследование колосников для определения причин и механизма протекания коррозионного разрушения «верхней» поверхности во время эксплуатации 97

2.7 Выводы 111

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛИТЫХ КОЛОСНИКОВ ИЗ СТАЛИ 40Х24Н12СЛ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ 113

3.1 Условия и методика моделирования 113

3.2 Анализ температурного градиента, напряжений и деформаций, возникающих в литых колосниках в процессе эксплуатации 122

3.2.1 Распределение температур по сечению колосника 122

3.2.2 Распределение деформаций по сечению колосника 123

3.2.3 Распределение напряжений по сечению колосника 126

3.3 Выводы 132

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ КОЛОСНИКОВ ОБЖИГОВЫХ ТЕЛЕЖЕК С ПОВЫШЕННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ РЕСУРСОМ 134

4.1 Корректировка химического состава литых колосников из стали 40Х24Н12СЛ 134

4.2 Доработка режима термообработки колосников 140

4.3 Модернизация технологии разливки колосников из стали 40Х24Н12СЛ изготовителем (ноу-хау) 147

4.4 Выводы 152

5. ПРОВЕДЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ 153

5.1 Параметры проведения промышленных испытаний литых колосников 153

5.2 Входной контроль экспериментальной партии литых колосников перед началом промышленных испытаний 158

5.3 Промышленные испытания 164

5.3.1 Результаты проведения промышленных испытаний опытной партии литых колосников на АО «Стойленский ГОК» по истечению первых 12-ти месяцев эксплуатации 164

5.3.2 Металлографический анализ «эталонных» и опытных колосников до и после 12-и месяцев эксплуатации 170

5.3.3 Результаты проведения промышленных испытаний опытной партии литых колосников на АО «Стойленский ГОК» по факту завершения промышленных испытаний (26-ти месяцев эксплуатации) 176

5.4 Определение экономического эффекта от применения литых колосников, изготовленных по экспериментальной технологии 183

5.5 Выводы 186

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 188

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Чертеж отечественного колосника из стали 40Х24Н12СЛ ... 199

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. 3-D вид обжиговой машины OUTOTEC АО «Стойленский ГОК» 200

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Технологическая схема обжиговой машины OUTOTEC АО «Стойленский ГОК» 201

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Рабочий план проведения промышленных испытаний колосников на АО «Стойленский ГОК» 202

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Спецификация на партию экспериментальных колосников, поставленных для промышленных испытаний 205

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Письмо-справка от ОАО «ЧЛМЗ» об источнике экспериментальной технологии 207

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Акт входного контроля колосников АО «СГОК» 208

ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Акт химического анализа опытных колосников, выполненного на АО «СГОК» 212

ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Чертежи колосников OUTOTEC, применяемых на АО «Стойленский ГОК» 213

ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Общий компоновочный чертеж обжиговой тележки АО «Стойленский ГОК» 215

ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Акт монтажа на ФОК АО «СГОК» экспериментальной партии колосников поставки ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ 216

ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Промежуточные ежемесячные акты контроля состояния колосникового поля при приведении промышленных испытаний на ФОК АО «СГОК» 217

ПРИЛОЖЕНИЕ 13. Акт контроля состояния колосникового поля (по истечении 12-и месяцев) при приведении промышленных испытаний на ФОК АО «СГОК» ... 237

ПРИЛОЖЕНИЕ 14. Контроля качества колосников опытной партии изготовленных по экспериментальной технологии после 2-х лет эксплуатации по факту завершения промышленных испытаний на ФОК АО «СГОК» 240

ПРИЛОЖЕНИЕ 15. Протокол Технического Совета АО «СГОК» об утверждении результатов промышленных испытаний опытной партии колосников 245

ВВЕДЕНИЕ

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 усовершенствования 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:

- Статистический анализ брака (включая макроанализ) колосников на производстве для выявления полного перечня возможных дефектов и его сегментирования;
- Микроанализ, металлографический анализ отбракованных колосников для определения первопричин дефектообразования;
- 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 $M_{23}C_6$ на базе карбида хрома $Cr_{23}C_6$)), изыскание мероприятий по исключению возможности образования этих дефектов:

- Оптимизация технологии выплавки и разливки, позволяющая исключить образование усадочных раковин;
- 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 (ø≥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:

- на этапе плавки – корректировку химического состава стали (для воспроизводимости результатов термообработки и оптимизации технико-экономических параметров плавки),
- на этапе разливки – оптимизацию технологии литья колосников за счет изменения схемы формовки и расположения прибылей в комплексе с повышением

температуры разливки и возможности применения безопочной формовки, что позволило исключить возможность образования усадочных раковин и улучшить технико-экономические параметры технологии изготовления колосников на данном этапе,

- 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 40Х24Н12СЛ (в том числе частично превосходящий зарубежные аналоги, признанные эталоном).

2. Применена математическая модель (по методу конченых 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 $Cr_{23}C_6$.

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 258-и страницах форматов А3-А4, содержит 33-и таблицы, 32-е формулы, 52-а рисунка. Библиографический список включает 109-ть наименований.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛОСНИКОВ И УСЛОВИЙ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ, АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРОРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВ

1.1 Характеристика детали

По ГОСТ 977-88 колосники для обжиговых машин конвейерного типа изготавливают из жаропрочной и жаростойкой при температурах до 1000°С, двухфазной хромоникелевой стали марки 40Х24Н12СЛ, химический состав см. таблицу 1.

Таблица 1. Химический состав

40Х24Н12СЛ (ГОСТ 977-88 [1])						
C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	S, %	P, %	Cr, %
до 0,4	0,5 – 1,5	0,3 – 0,8	11,0 – 13,0	до 0,03	до 0,035	22,0 – 26,0

При комнатной температуре, в стали 40Х24Н12СЛ, которая не подвергалась термической обработке или другим технологическим операциям, приводящим к изменению структуры, присутствует 2 матричные фазы – аустенит и феррит. Оценить количество фаз возможно при помощи структурной диаграммы нержавеющих сталей [2, 9], которая учитывает влияние каждого легирующего элемента, присутствующего в стали, на её структуру (рис. 1).

Для расчёта эквивалент никеля примем за *x*, эквивалент хрома за *y*, тогда для стали 40Х24Н12СЛ формулы эквивалентов примут вид:

$$x = \%Ni + 30\cdot\%C + 0{,}5\cdot\%Mn = 18{,}275, \quad (1)$$

$$y = \%Cr + \%Mo + 1{,}5\cdot\%Si + 0{,}5\cdot\%Nb = 25{,}5. \quad (2)$$

В результате построения результатов расчётов на диаграмме нержавеющих сталей (рис. 1) было определено, что в структуре стали, при комнатной температуре, присутствует 5 % феррита и 95 % аустенита.

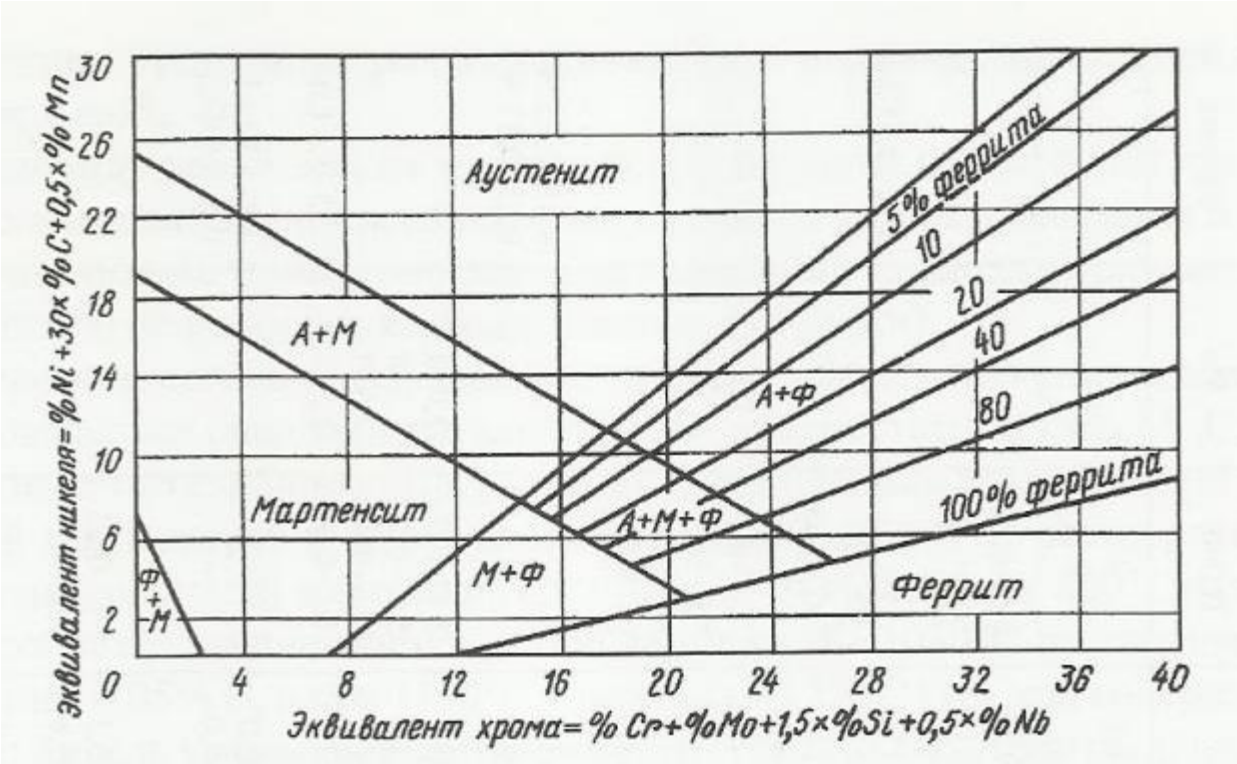


Рисунок 1. Структурная диаграмма нержавеющих сталей

Общий вид колосника для обжиговой машины ОК-306 показан на рис. 2, чертёж (вид сбоку) на рис. 3, а полный чертёж по профилям с допусками и отклонениями – в приложении 1. В приложении 9 представлены чертежи колосников, применяемых на обжиговых машинах Outotec (Лурги), на предприятиях АО «Стойленский ГОК» и ОАО «ОЭМК».

Параметры изъятия колосников из эксплуатации определяются в первую очередь функцией колосникового поля – пропускать газ (теплоноситель) и не пропускать окатыши. Отбраковывание колосников происходит по средствам визуального контроля технологических признаков изменения геометрических размеров детали: увеличение ширины зазоров в колосниковом поле (приводящее к просыпи окатышей в газо-дутьевую систему), коррозионное разрушение, искажения в плоскостях, разрушения и изломы. Новые колосники должны соответствовать следующим метрикам: ширина 40 ± 0,4 мм, длинна 330 ± 2 мм, приливы 4 мм с каждой стороны (см. рис. 5).

Рисунок 2. Колосники обжиговой машины ОК-306, общий вид

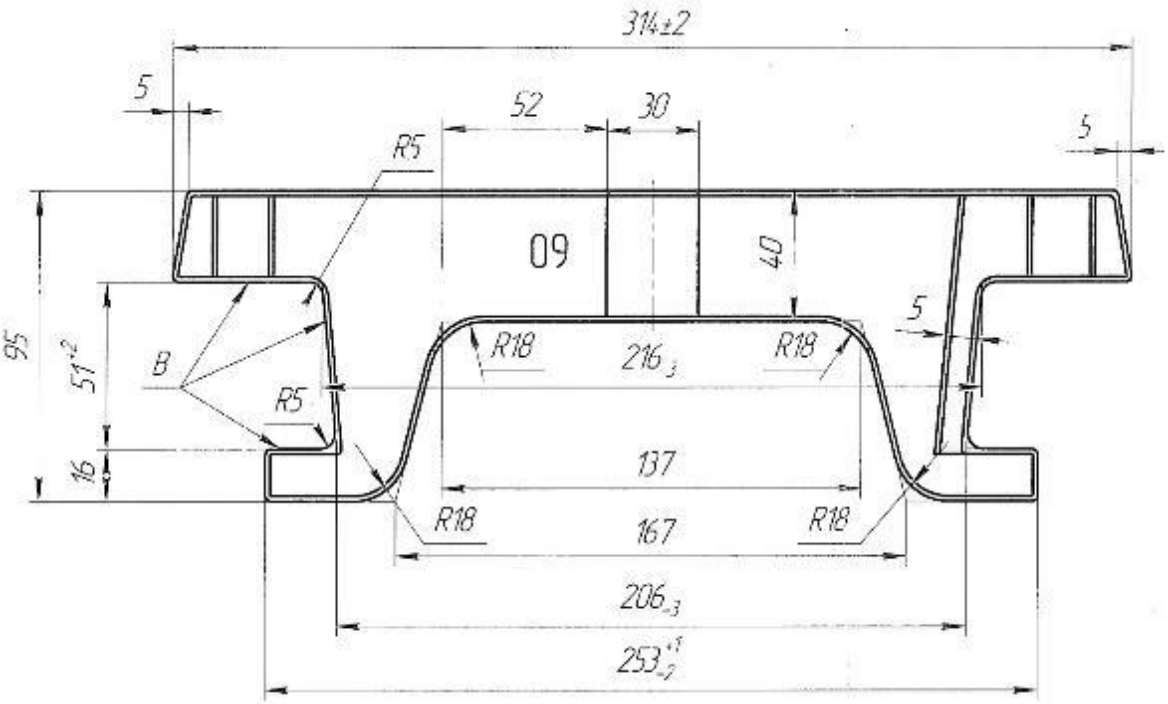


Рисунок 3. Основные размеры колосника

Одновременно в эксплуатации на предприятиях находятся десятки тысяч колосников. На АО «Лебединский ГОК» обжиговая машина ОК-306, с количеством колосников ~57 000, ОАО «СевГОК» ~80 000 «Лурги»-552 [1], на ОАО «ОЭМК» обжиговая машина «Лурги»-480 с количеством колосников ~70 000, на АО

«Стойленский ГОК» обжиговая машина «Outotec»-768 с количеством колосников ~112 000 (данный параметр зависит от длинны обжиговой машины, которая определяется её полезной площадью / производительностью).

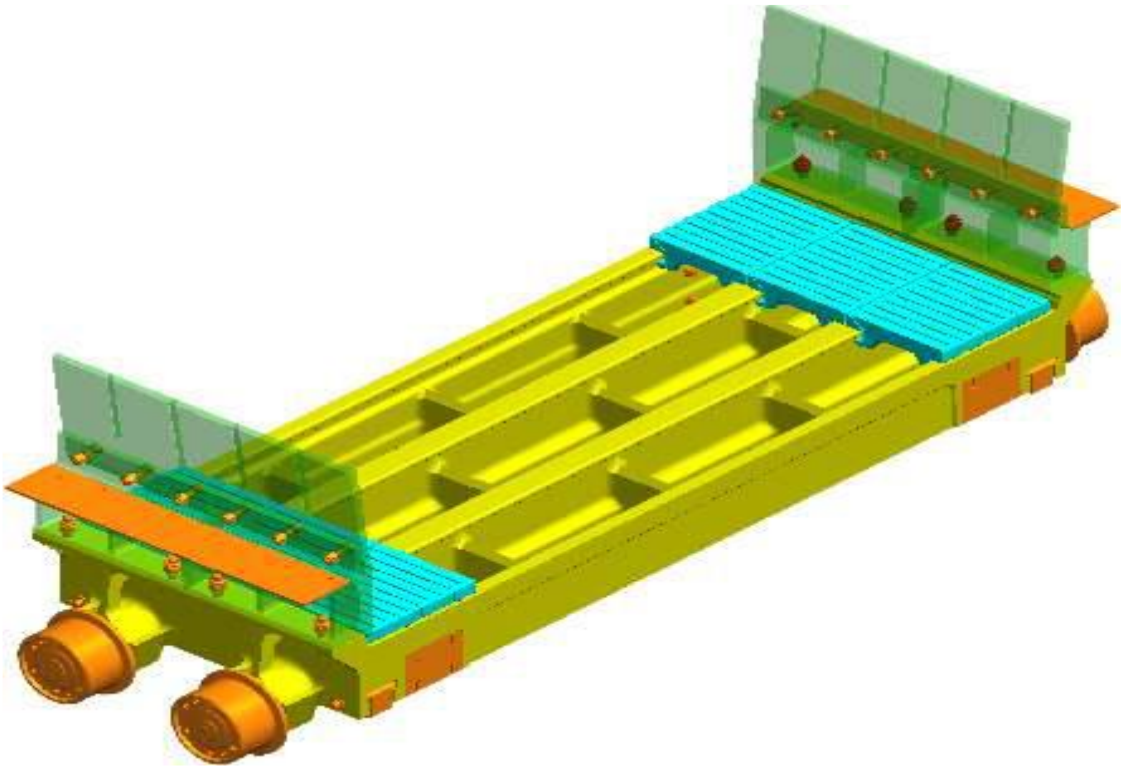


Рисунок 4. Модель обжиговой тележки с частично установленной колосниковой решеткой

Рама обжиговой тележки имеет стойкость ~10 лет, изготавливается из стали 15ХМЛ, плиты боковая и нижняя отливаются из стали марки 30Х24Н12СЛ, боковина – из стали марки 20ХМЛ [1]. Необходимо заметить, что подколосниковые балки периодически переворачивают при достижении прогиба рамы более 15 градусов, так, отсутствие контроля величины прогиба подколосниковой балки может привести к преждевременному выходу из строя колосников при эксплуатации.

Рисунок 5. Колосниковый ряд, установленный на обжиговую тележку

Колосники отливаются из высоколегированной хромоникелевой стали марки 40Х24Н12СЛ, учитывая дефицитность дорогостоящих легирующих элементов и низкий эксплуатационный ресурс детали становится очевидной актуальность изыскания путей повышения эксплуатационного ресурса применяемой стали 40Х24Н12СЛ или поиска её альтернативы.

1.2 Основные параметры колосников

Параметры колосников обжиговых тележек должны соответствовать требованиям нормативной документации, а также индивидуальным требованиям заказчика детали. Выдвигаемые разными потребителями требования и рекомендации к колосникам разнятся. Ниже приведены основные существующие на сегодняшний день требования и рекомендации, которым должны соответствовать колосники (по разным данным):

1) по ГОСТ 977-88 рекомендуется выполнять закалку в воде, масле или на воздухе при 1040-1060°С [2].
2) Колосники должны проходить испытание на жаростойкость по методике, определённой ГОСТ 6130-71 [10].
3) Механические свойства детали:
   i) условный предел текучести $\sigma_т$:
      (a) после закалки при 1050°С в воде, масле или на воздухе $\sigma_т$= 245 МПа,
      (b) после охлаждения в форме $\sigma_т$= 215 ÷ 235 МПа,
   ii) временное сопротивление разрыву (предел прочности при растяжении) $\sigma_в$:
      (a) после закалки при 1050°С в воде, масле или на воздухе $\sigma_в$= 491 МПа,
      (b) после охлаждения в форме $\sigma_в$= 550 ÷ 610 МПа,
   iii) относительное удлинение после разрыва δ:
      (a) после закалки при 1050°С в воде, масле или на воздухе δ= 20 %,
      (b) после охлаждения в форме δ= 24 ÷ 38 %,
   iv) относительное сужение ψ:
      (a) после закалки при 1050°С в воде, масле или на воздухе ψ= 28 %,
      (b) после охлаждения в форме ψ= 29 ÷ 49 %,
   v) ударная вязкость после охлаждения в форме KCU = 34 ÷ 78 Дж/см^2.
4) Физические свойства:
   i) плотность ρ = 7800 кг/м^3 при температуре t= 20°С,
   ii) литейная усадка 2,7 %,

iii) масса колосника 4,2 кг.

5) Точность отливки по ГОСТ Р 53464-2009 [12] – класс точности 13-ый:

i) отклонения от плоскости и прямолинейности не более 0,64 мм,

ii) степень коробления по высоте не более 0,40 мм, по длине не более 1,20 мм,

iii) допуск массы отливки не более 0,1 кг,

iv) допуск смещения от плоскости разъёма не более 0,56 мм (для отливки).

6) Литейные уклоны по ГОСТ 3212-92 [13]:

i) при литье в песчано-глинистую смесь - формовочные уклоны поверхностей модельного комплекта по модели колосника: ширина - 0,6 мм, высота - 0,75 мм, длинна - 2,30 мм,

ii) допуски размеров модельного комплекта (класс точности модельного комплекта – 2) по ширине модели колосника: 0,10 мм, по высоте модели колосника: 0,13 мм, по длине модели колосника: 0,18 мм.

7) Местные поверхностные углубления или выступы с плавным переходом к основной поверхности не должны превышать 2 мм, находится в количестве не более 10 штук на всей поверхности колосника и занимать площадь не более 9 мм. На поверхностях замковой части колосника и плоскостях примыкания колосников друг к другу указанные дефекты не допускаются.

i) Наружные и внутренние дефекты (по ГОСТ 19200-80) в т.ч. в виде трещин, пористости, спаев, пленов, утяжин или ужимин, усадочных и газовых раковин, а также исправление дефектов заваркой не допускается.

8) Контроль внешнего вида подвергается 100 % колосников от предъявленной партии. Контроль размеров подвергается 5 % колосников от предъявленной партии, но не менее 10 штук, при обнаружении дефектов контролю подвергается удвоенное количество колосников, при повторном обнаружении дефектов в удвоенном количестве колосников все колосники предъявленной партии подвергаются проверке.

9) Места от прибылей должны обрабатываться вровень с основной поверхностью.

10) Маркировка на изделии: товарный знак завода – изготовителя, год выпуска. Знаки маркировки должны быть литыми в виде углублений.
11) Сертификат на партию должен содержать: данные изготовителя (адрес, товарный знак, наименование), данные потребителя (адрес, требования), номера плавки/партии/чертежа, количество штук, дату изготовления, дату отгрузки, марку стали, массу отливки, сертификат механических и физических испытаний, химического анализа и термической обработки (ГОСТ 977-88).

По сложившейся практике (не только отечественной, но и мировой), все вышеописанные параметры, кроме химического состава, имеют для поставщиков рекомендательный характер, и по факту, зачастую не отслеживаются заказчиками. Связано это сразу с несколькими факторами: выявить на входном контроле колосники низкого качества очень сложно, зачастую невозможно, для отслеживания части параметров необходимо оборудование и специалисты (например, испытания на жаростойкость), а отслеживание другой части параметров несет в себе малую практическую ценность для заказчиков, так как достоверно не предсказывает эксплуатационный ресурс детали (например, механические свойства детали, её вес и соответствие геометрических размеров чертежам). В связи с этим, на предприятиях заведена практика промышленных испытаний колосников при отклонении каких-либо параметров поставки от применяемых (например, при покупке у нового поставщика, при поставке колосников из новых материалов, при изменении геометрии делали и т.д.).

1.3 Условия эксплуатации

Учитывая потребности рынка - основной тренд оптимизации прибыли на конвейерных обжиговых машинах направлен на увеличение производительности. Последнее достигается за счёт: повышения эксплуатационных температур [6], увеличения зоны реакции (зоны обжига) за счёт уменьшения других зон [7, 8] и иных факторов. В результате таких оптимизаций – стойкость колосников отечественного производства из стали 40Х24Н12СЛ снизилась на 30% и более (в зависимости от конкретных изменений), что в среднем составляет: 6÷12 месяцев на ОАО «Северный ГОК» [9], 5÷12 месяцев АО «Лебединский ГОК» и 8÷12 месяцев на ОАО «ОЭМК» при гарантированном сроке службы как минимум 12 месяцев.

Учитывая непрерывный режим эксплуатации – колосники пребывают в агрессивной высокотемпературной эксплуатационной среде круглосуточно (термоциклирование). Для прососа теплоносителя через слой колосниковой решётки и окатыша – необходимо разряжение в диапазоне от 0.9 да 5.8кПа [14, 15] (разряжение, как и температуры рабочего пространства зон обжиговой машины подбирается из условий шихты – на отечественных предприятиях это дополнительно осложнено необходимостью полного окисления магнетита до гематита). Так, температура эксплуатации колосников находится в диапазонах от 20 до 1350°С, а температуры перегревов в зоне обжига – от 850 до 1270°С [8, 14].

На обжиговых машинах применяют комплекс мер для защиты комплектующих обжиговых тележек от ускоренного износа. Основной мерой защиты является слой или «постель» (донная/бортовая), укладываемый из обожжённых окатышей рекомендованного гранулометрического состава (10-12 мм). Так, донный слой: 80 ± 20 мм [7], бортовой: 340÷460 мм [6,7] (в зависимости от высоты слоя сырых окатышей). Соответственно, донный слой защищает колосниковой поле и укладывается непосредственно на него, бортовой слой защищает бортовые плиты обжиговой тележки, и укладывается вдоль них на глубину 100 мм от бортов, свободно распределяясь по углу естественного откоса по верх донного слоя.

Дополнительно можно выделить конкретные параметры обжиговой машины, оказывающие воздействие на характеристики колосников при их эксплуатации, это: скорость движения обжиговых тележек (1,5 – 4,5 м/с [7]), установленные температуры под полем паллет (t°C в зоне обжига под вакуум-камерами) и обжига (max t°C), от суммарной высоты слоя окатышей (донный слой и слой сырых окатышей) и перегревов при остановках на замену телег, при которых подача газа не прекращается (системных простоев по 1-3 раза в сутки на 5-15 мин. Технологические режимы разных обжиговых машин сильно разнится, из-за чего также разнится и температура зоны обжига:

- 1260°C (с допустимым пределом до 1300°C) для обжиговой машины «Outotec»-768 АО «Стойленский ГОК»;
- 1280°C для обжиговой машины ОК-306 АО «Лебединского ГОКа» [8];
- 1350°C для обжиговой машины «Лурги»-480 ОАО «ОЭМК» [14];
- 1325°C для обжиговой машины ОК-228 ОАО «Качканарского ГОКа» [16];
- 1310°C для обжиговой машины ОК-124 АО «ССГПО» [17].

Допустимая температура под слоем паллет «Лурги» (480 м^2) - 520°C, что обуславливает температурный режим машины в общем. Так, на границе «слой постели – сырой окатыш» температура составляет от 1230 до 1250°C, соблюдение заданных параметров позволяет достичь и требуемое качество и высокую с [14]. Для обжиговой машины ОК-306, эксплуатируемой на АО «Лебединский ГОК» температура под колосниковым полем по технологии производства также не должна превышать 480°C.

Колосниковая решетка эксплуатируется в условиях высоких температур, пик которых достигается в зоне обжига: над слоем 1260÷1350°C, под паллетами 480÷520°C (температура под паллетами отслеживается на всех обжиговых машинах для исключения перегрева комплектующих ОМ) и локальными перегревами колосников на границе «постель – колосниковая решетка» до 1250°C (при коротких остановках на 5÷10 мин), при том, что по ГОСТ 977-88 рекомендованная температура эксплуатации - 1000°C.

1.4 Особенности эксплуатации отливки

1.4.1 Влияние атмосферы обжиговой машины на ресурс колосников

Установлено, что при обжиге окатыша в атмосферу рабочего пространства обжиговой машины попадают соединения NO_x и SO_x. Известна работа [18], доказывающая этот факт. Содержание оксидов серы зависит от ее содержания в обжигаемом окатыше. С годами разработки месторождений курской магнитной аномалии - содержание серы в извлекаемой руде неуклонно росло с 0,15 до 0,5 %. Связано это в том числе с добычей руды на большей глубине.

Процесс десульфурации хорошо развивается при обжиге из-за пористости окатышей и высоких температур в зоне обжига, степень удаления серы достигает 90 % [19], чем выше температура и время выдержки – тем выше степень удаления SO_x из окатышей [5]. Авторами [20, 21] установлено наличие соединений серы в окалине колосника, что является признаком участия серы в коррозии колосников.

В рудах большинства типов сера находится в виде химических соединений с железом, реже в виде сульфидов цинка, свинца, меди и сульфатов бария и кальция. Самыми распространёнными соединением серы в природе можно назвать пирит (марказит) FeS_2 и пирротин FeS_{1+x}. Наиболее редким - троилит FeS.. Хотя в работе [22] приводится, что сера в окатышах может находиться в форме сульфидов FeS_2, FeS и сульфатов $CaSO_4$, $FeSO_4$ и $MgSO_4$. Условия удаления сульфидной и сульфатной серы из окатышей отличаются.

Удаление сульфида из окатыша развивается следующим образом:

$$FeS_2 \rightarrow FeS \rightarrow S.$$

Распад FeS_2 происходит при t°C в диапазоне от 250 до 400°C.

1. Реакция развивается стремительно при относительно не высокой t°C:

$$FeS_2 \rightarrow FeS + ½*S_2; \quad (3)$$

Процесс десульфурации развивается с самого начала процесса обжига.

2. Реакция, развивающаяся при обжиге:

$$FeS \rightarrow Fe + ½*S_2. \quad (4)$$

3. И уже при t°C в диапазоне от 900 до 1300°C процесс происходит с наибольшей скоростью:

$$FeS + 3*Fe_3O_4 = 10*FeO + SO_2 \text{ или } S + 2*Fe_3O_4 = 6*FeO + SO_2. \quad (5)$$

При этом, сульфатная сера удаляется из окатышей только в диапазоне температур 1000÷1300°C:

$$2*CaSO_4 = CaO + SO_2 + ½*O_2. \quad (6)$$

И. С. Куликов и Г. М. Комиссаров термодинамическим анализом нашли, что известняк поглощает сернистый газ с образованием сульфата уже при 400 – 800 °C [23]:

$$CaCO_3 + SO_2 + ½*O_2 = CaSO_4 + CO_2; \quad (7а)$$

$$\Delta Z^0 = - 77000 + 26{,}03 \cdot T,$$

$$\lg K_p = - 16850/T + 5{,}68,$$

$$CaO + SO_2 + ½*O_2 = CaSO_4; \quad (7б)$$

$$\Delta Z^0 = 119490 + 63{,}73 \cdot T,$$

$$\lg K_p = 26120/T + 13{,}93,$$

$$CaO \cdot Fe_2O_3 + SO_2 + ½*O_2 = CaSO_4 + Fe_2O_3; \quad (7в)$$

$$\Delta Z^0 = 114200 + 63{,}73 \cdot T,$$

$$\lg K_p = 2500/T + 13{,}93.$$

В результате чего часть серы адсорбируется в поверхностные слои окатыша, если в нём находится известь.

Авторами [24] установлено: при нагреве до 300 – 400 °C происходит разложение пирита на твёрдый раствор серы в троилите и газообразную свободную серу. Окислительная атмосфера способствует процессу перехода пирита в окислы железа и серы:

1) при t°C ≤ 600 – 650 °C:

$$2*FeS_2 + 5{,}5*O_2 = Fe_2O_3 + 4*SO_2, \quad (8а)$$

2) при t°C ≥ 600 – 650 °C развивается горение пирротина и диссоциация пирита:

$$FeS_2 = FeS + ½*S_2, \quad (8б)$$

$$½*S_2 + O_2 = SO_2, \quad (8в)$$

$$2*FeS + 3,5*O_2 = Fe_2O_3 + 2*SO_2. \quad (8г)$$

Термодинамические расчеты, выполненные авторами [21], показали, что при температурах среды ≤ ниже 600°С – в среде преобладает концентрация SO_3, а при ≥1000°С – SO_2.

Так, содержание SO_2 в отходящих газах возрастает с одиннадцатой по пятнадцатую вакуум-камеры обжиговой машины «Лурги» - ОК-552 [5], в зонах обжига и рекуперации, при температурах в горне 1100 – 1300°С. Более всего колосники подвержены отрицательному воздействию газовой среды в высокотемпературных зонах нагрева, обжига и рекуперации, в конвейерной машине ОК-552 это зона с 10 по 15 вакуум-камеры, где температура теплоносителя над слоем окатышей составляет 1000 – 1280°С [5].

Также, по данным исследований [5]: на обжиговых машинах ОК-306 АО "Лебединский ГОК" в атмосфере рабочего пространства содержатся NO_x, CO и SO_2. Были проведены исследования, доказавшие что концентрация SO_2 в зоне обжига резко возрастает, и на второй минуте процесса, в этой зоне, достигает максимального значения, затем концентрация газа начинает постепенно снижаться.

Известно, что серосодержащий газ окисляет никель при высоких температурах. При этом образуется окалина, которая включает в себя NiS и NiO:

$$3*Ni + SO_2 = NiS + 2*NiO. \quad (9)$$

Сульфиды никеля, не различимы в структуре стали до увеличения х600, сильно увеличивают склонность стали к трещинообразованию, т.к. сульфидная фаза характеризуется легкоплавкостью (температура плавления Ni_3S_2 – 787° С) и способностью смачивать границы первичных зёрен аустенита [25].

На стойкость колосников главным образом влияет режим термообработки. Численные эксперименты по различным методам ведения технологических процессов доказали [6], что удельные расходы энергоносителей снижаются при высоких температурах обжига. Такая оптимизация неизбежно влечёт ускоренный износ оборудования (обжиговых тележек, подколосниковых балок, колосников, бортовых пластин и др.).

Авторы [5] утверждают, что наличие в газодутьевом потоке абразивной пыли приводит к дополнительному износу боковых поверхностей колосников. Таким образом, просос неочищенного газа должен приводить к дополнительному износу боковых поверхностей колосников, балок и бортовых пластин.

Тренд на повышении производительности оборудования и высокую степень десульфурации привел к росту максимальных температур в зонах обжига и рекуперации, а также к росту количества вредоносных для колосников соединений SO_x в рабочем пространстве (при этом, влияние наличия пыли как абразива, а также возросшего содержания соединений NO_x и CO на стойкость колосников не установлено).

1.4.2 Влияние температурного режима обжиговой машины эксплуатационные свойства колосников

Как описано ранее, на отечественных обжиговых машинах массово внедрены оптимизационные мероприятия направленные на повышение производительности и десульфурацию. В режиме эксплуатации это достигается одинаковыми параметрами. С точки зрения стойкости колосников (и других комплектующих) стоит выделить анализа режимов эксплуатации обжиговой машины [14] (при разной производительности). Из исследования можно сделать вывод, что повышение производительности достигается в основном за счет повышения рабочих температур (а соответственно, и скорости охлаждения). Аналогично выполнена оптимизация технологического процесса обжиговой машины «Лурги-480», после которой возросла температура на границе слой окатышей - колосниковое поле, что потребовало увеличить скорость сушки (при минимальном изменении скорость движения паллет) [14], в результате чего, процесс охлаждения протекает более интенсивно, что повышает склонность оборудования (обжиговых тележек, колосников и др.) к дефектообразованию (трещинообразованию) [25].

Был проведен сравнительный анализ распределения давлений и температур по длине обжиговой машины

Аналогичные оптимизационные мероприятия выполнены на ОМ ОК-306, что позволяет сравнить технологические параметры 2-х принципиально разных схемам. Параметры распределения давления и температур по длине машины см. на рис. 6 и 7 [8]. Схема распределения давлений и температур рис. 6 с использованием нагретого воздуха (250÷275°С) в зоне охлаждения, а на рис. 7 по всей длине зоны охлаждения используется атмосферный воздух.

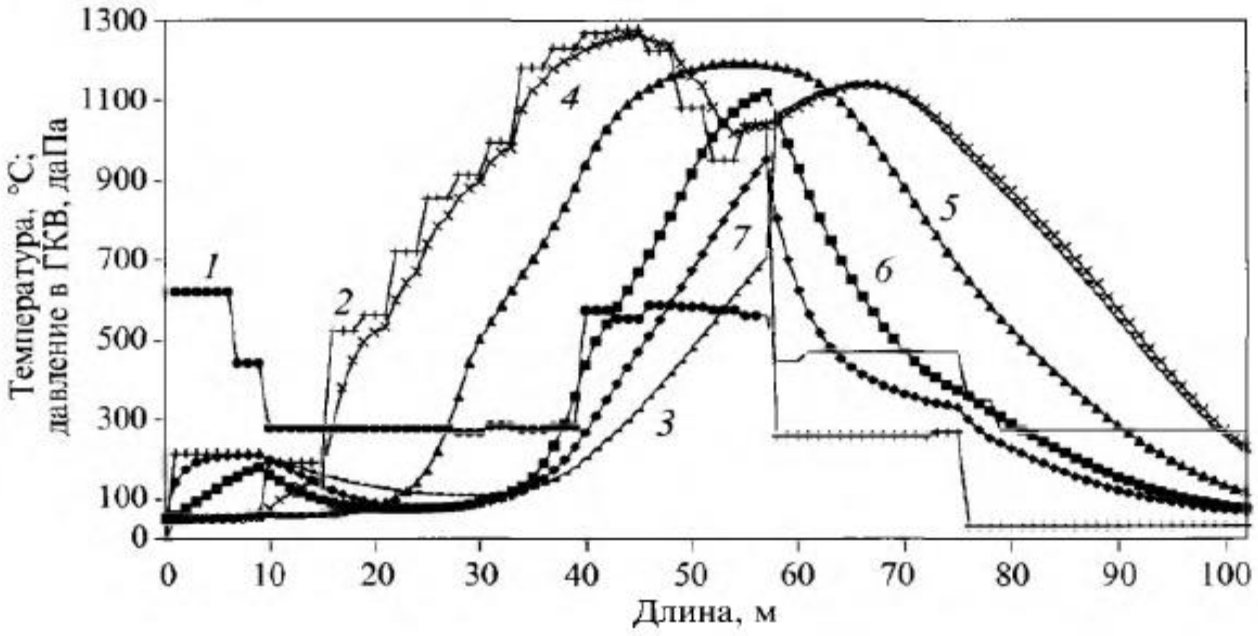


Рисунок 6. Схема трендов по длине машины при охлаждении слоя нагретым воздухом

Обозначения: 1 – разряжение/давление; 2, 3 – t°С среды до окатышей и после соответственно; 4, 5 – t°С верхней части и средней части обжигаемого слоя соответственно, 6, 7 – t°С границ «слой – постель» и «постель – паллеты» соответственно.

Из всех представленных на рисунках данных, наибольший интерес представляет кривая распределения температур *7*, или кривая температур нижнего слоя постели и, соответственно, температура верхних участков колосниковой решетки. На отметке 57 метров кривой *7* температура имеет максимальное значение на обоих графиках – 930°С, что говорит о прогреве на соответствующую температуру контактной поверхности «постель – обжиговая решетка», которой

достаточную для выделения феррита из аустенита и протекания процессов образования карбидов и σ–фазы, активно развивающихся при температурах 600 ÷ 800°С [26].

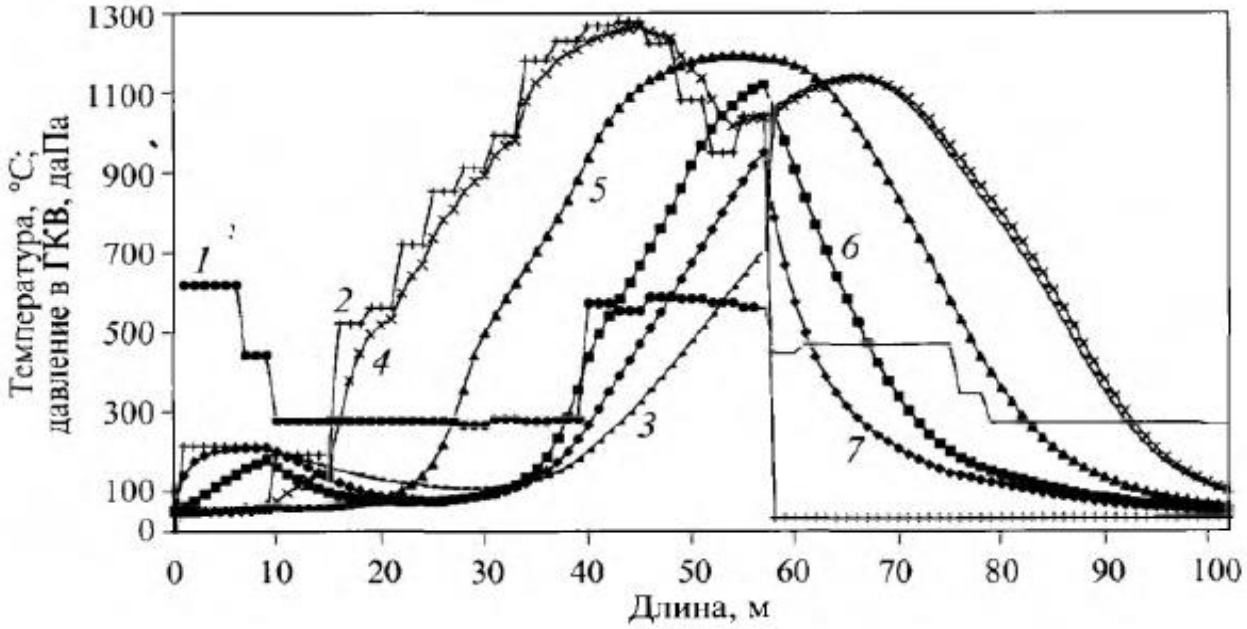


Рисунок 7. Схема трендов по длине машины при охлаждении слоя холодным (атмосферным) воздухом

Обозначения: 1 – разряжение/давление; 2, 3 – t°С среды до окатышей и после соответственно; 4, 5 – t°С верхней части и средней части обжигаемого слоя соответственно, 6, 7 – t°С границ «слой – постель» и «постель – паллеты» соответственно.

Исходя из того, что средняя скорость движения обжиговой машины, исследование теплового режима которой представлены на рис. 6 и 7, составляет 3,0 м/мин [7], можно определить скорость охлаждения поверхностей колосников обжиговых тележек в интервале температур 930÷330°С. Так, для тепловой схемы на рис. 6 скорость охлаждения по кривой № *7* составляет 95°С/мин, а для схемы на рис. 7 – 222°С/мин. Колосники, эксплуатируемые на обжиговой машине со схемой охлаждения нагретым воздухом (рис. 6), будут менее склонны к трещинообразованию, связанному с температурным градиентом по сечению детали [25], но будут более склонны к процессам изменения структуры колосника

(выделению феррита, карбидов и σ–фазы) [27], а колосники, установленные на обжиговую машину со схемой охлаждения атмосферным воздухом (рис. 7) - наоборот.

Таким образом, на новейших обжиговых машинах ведущих зарубежных фирм (Outotec (Лурги), Даниэли, Корус, Swedala, CVRD и др.) охлаждение нагретым воздухом не используется, что вызвано, в том числе, потребностью в надежности работы оборудования (такого как обжиговые тележки, колосники и др.) [8].

Необходимо отметить, что не целесообразна подача высокотемпературного (~550°С) теплоносителя из зоны охлаждения в зону сушки. Использование такого решения позволяет экономить на затратах природного газа, но вызывает ускоренный износ оборудования (колосники, обжиговые тележки, ТДМ и т.д.) и деформацию подколосниковых балок [7] вследствие повышения средней температуры обжиговой тележки и прососа неочищенного газа [7]. Следует отметить, что для подачи теплоносителя из зоны охлаждения в сушку необходимо применение дополнительного оборудования, что влечет увеличение удельных расходов электроэнергии и необходимость капитальных затрат [8]. Помимо этого, из-за серы, выделяемой с самого начала процесса нагрева окатышей в рабочее пространство ОМ, технологическое решение подавать теплоноситель из рекуперации в сушку может быть не эффективным [28].

На большинстве обжиговых машин (ОК-306, Outotec-768 и др.) «угорание» боковых поверхностей колосника происходит по всей его поверхности (без повышенного угара поверхности приливов), другими словами – зазор между колосниками годами не превышает предельных показателей (8 мм). Это позволяет не выбраковавыть деталь, а просто производить уплотнение рядов новыми, что существенно продлевает эксплуатационный ресурс. Это может быть связано с повышенной садкой постели и в результате низкой порозности слоя – происходит «заперание» зазоров для прососа газа, что вызвано повышенным содержанием пыли и мелкого окатыша (-8мм) в постели, низкой прочностью сырого окатыша (который в результате процесса сушки разрушается). Хорошо известно, что

технологический процесс будет осложнён, в случае реализации решения применять в зоне сушки теплоноситель из зоны обжига. Связано это с тем, что в теплоноситель не осушается от излишков влаги из окатышей, что может приводить к переувлажнению слоя и ухудшению его газопроницаемости в результате садки [7].

Таким образом, в результате оптимизаций тепловых режимов на разных обжиговых машинах сформировались разные условия эксплуатации колосников, чем современнее обжиговая машина – тем благоприятнее для её оборудования температурный режим термоциклирования, но при этом, тем выше на ней температура в зоне обжига. Современные колосники обжиговых тележек должны удовлетворять требованиям любого режима эксплуатации, существующего на сегодняшний день – выдерживать как градиенты температур при быстрых теплосменах, так и локальные перегревы в зоне обжига.

1.4.3 Влияние параметров эксплуатации обжиговой машины на ресурс колосников обжиговых тележек

На эксплуатационный ресурс оборудования обжиговой машины (в т.ч. обжиговых тележек, колосников, подколосниковых балок и бортовых пластин) существенное влияние оказывает автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП). Так, подсистема стабилизации параметров за счёт реализации контуров автоматического регулирования обеспечивает работу обжиговой машины в области регламентированных режимов и минимизацию технологических нарушений. В частности – соблюдение установленных границ рабочих температур на горелках, что увеличивает долговечность их комплектующих (в т.ч. колосников) [16]. Например, при пусках и остановках обжиговой машины АСУТП выполняется регулировка нестационарного технологического режима, что позволяет исключить человеческий фактор системно уменьшить температурный износ оборудования (в т.ч. колосников) [16].

Современная тенденция развития управления производством предполагает уменьшение зависимости от человеческого фактора. Если раньше

производительность и качество окатышей в наибольшей степени зависело от опыта и интуиции оператора (технолога), то теперь ведение процесса в большей степени возложено на АСУТП.

На обжиговой машине Outotec-768 АО «Стойленский ГОК» внедрена современная система автоматизации, построенная на программных и аппаратных решениях фирмы Siemens, позволяющая управлять и стабилизировать процесс производства обожжённых окатышей на всех этапах процесса. Производство окатышей на фабрике разработано основываясь на передовые мировые решения для систем базовой автоматизации, управления технологическим процессом и его оптимизации. Ядром системы является система автоматизированного управления SIMATIC PCS7 (Process Control System 7) разработки фирмы Siemens. Основываясь на данных базовой автоматизации (сбор данных с первичных приборов) происходит обработка и выдача сигналов управления. Основные возможности такой системы:

- функции операторского контроля и мониторинг технологического процесса;
- компоненты автоматизации для управления исполнительными механизмами;
- функции архивирования и резервирования;
- библиотека объектов с информационными, диагностическими и мультимедийными диалогами;
- мощная диагностическая система, позволяющая быстро найти источник ошибки и способствующая снижению временных затрат на возобновление производства;
- управление информацией;
- оптимизация технологического процесса.

В итоге с помощью системы автоматизации поддерживается оптимальный режим эксплуатации и равномерность производства, результатом чего является высочайшее качество продукции. Кроме того, АСУТП фабрики окомкования АО

«Стойленский ГОК» обеспечивает разумное использование энергии и сырья, соблюдая самые современные экологические требования.

Необходимо отметить, что практически на всех производствах применяется идентичный набор систем управления технологическим процессом, которые выполняют свои функции, и сравнивать можно только применяемые решения (программные или аппаратные), реализованные в рамках этих систем.

Таким образом, глубина внедрения АСУТП влияет на эксплуатационный ресурс колосников через стабилизацию эксплуатационных параметров (исключение перегревов при остановках путём снижения расхода газа, устранения человеческого фактора, использования более глубокого контроля технологического процесса и т.д.). При этом, для ресурса эксплуатируемого оборудования значимым остаётся не допущение нештатных ситуаций (длительных перегревов, нарушения контрольных параметров, таких как: контроль горения (в т.ч. подачи теплоносителя), величины постели, температуры под колосниковым полем и т.д.).

1.4.4 Влияние качества обжигаемого сырья на стойкость колосников обжиговых тележек

В литературных источниках [20, 29] при исследовании окалины колосников (изготовленных из стали 40Х24Н12СЛ) установили, что она формируется не только под воздействием газовой фазы (продуктов сгорания природного газа, описанных ранее), но и с участием компонентов окатышей, в составе которых продукты взаимодействия тонких фракций железорудных концентратов с щелочными импортными бентонитами.

Наиболее высококачественный щелочной бентонит представлен главным по массе (до 80-85 %) минералом монтмориллонитом, полевым шпатом, иллиитом, кварцем и небольшим количеством кальцита и гипса. Минеральная формула монтмориллонита [30]:

$$Al_{1,76} \cdot Mg_{0,33} \cdot [(OH)_2 \cdot Si_4O_{10}]_{0,33} \cdot Na_{0,33} \cdot (H_2O)_4.$$

Полевые шпаты представлены группой минералов, крайними членами которых являются два щелочных минерала альбит $NaAlSi_2O_8$ и ортоклаз $KAlSi_3O_8$ и один щелочноземельный анортит $CaAl_2Si_2O_8$. Глинистый минерал иллиит имеет сложную формулу $(K\ H_2O)\cdot(Al, Mg, Fe)_2\cdot(Si, Al)_4O_{10}\cdot[(OH)_2H_2O]$ [31]. Кислородные соединения щелочных металлов, содержащиеся в этих минералах, придают бентониту соответствующие физико-химические свойства [32]. Чтобы бентонит интенсивно набухал, требуется большое значение отношения Na_2O:CaO %, что достигается высоким содержанием Na_2O в монтмориллоните и наличием щелочных минералов в составе полевых шпатов.

Исследуя окалину колосников после обжига окатышей с вышеперечисленными видами бентонита установлено, что оксиды щелочноземельных минералов, содержащихся в составе связки, могут влиять на формирование структуры и свойств окалины колосников. Этот тезис нашёл частичное подтверждение в исследовании [20], при проведении прецизионных экспериментов с применением электронной микроскопии.

При более глубоком изучении вопроса было установлено [29], что при обжиге окатышей со связкой из щелочного бентонита возможно образование хроматов натрия и калия, снижающих эрозионную стойкость колосников.

Несмотря на то, что сырой окатыш отделен от колосниковой решетки слоем «постели», очевидно, что происходит влияние активированного бентонита на процесс окалинообразования колосников, что можно связать с попаданием мелкой фракции сырого окатыша (-8 мм) на поверхность колосника при его загрузке и сушке через «постель». Значимость этого процесса на эксплуатационный ресурс колосников в данной работе принимается минимальной.

1.5 Анализ аналогов

1.5.1 Анализ сталей и сплавов, используемых на отечественных производствах

Был выполнен анализ материалов, применяемых на родственных производствах с целью определения перспективных направлений дальнейших изысканий. Аналог не должен существенно отличаться по стоимости.

Учитывая, что существенная часть себестоимости колосников из стали 40Х24Н12СЛ это затраты на применение в шихте при плавке никеля и хрома. Хорошо известно, что жаростойкость, в свою очередь, также зависит от содержаний Cr и Ni. Учитывая удовлетворительную жаростойкость детали – изыскание аналогов выполнялось в близких границах по концентрации хрома и никеля.

Изыскания показали, что целесообразность применения Si и Al в стали 40Х24Н12СЛ не однозначна. Э. Гудремон [33] в своих исследованиях показал, что Si и Al повышают сопротивляемость серной коррозии при высоких температурах. Но Si вытесняет углерод к межфазным границам, что увеличивает склонность структуры к выпадению карбидной фазы, особенно при длительных перегревах. Концентрации Si и Al дополнительно учитывались в анализе.

В первую очередь были изучены сплавы, применяемые на аналогичных производствах, результаты анализа приведены в таблице 2.

Кольская ГМК (п.№6 таблицы 2) обрабатывает медно-никелевые руды, температура рабочего пространства при такой обработке не выше 900°С. Отсутствие высокотемпературного воздействия позволяет применять колосники с низким содержаниям никеля. При этом в установлено [34, 94], что при температурах эксплуатации выше 315°С такие стали имеют высокую склонность к межкристаллитной коррозии (МКК). При температурах выше 900°С применение данной марки стали не рекомендуется, а как доказано ранее – колосники

обжиговых машин эксплуатируются в температурных интервалах до 1000°С и краткосрочных локальных перегревов до 1250°С.

Таблица 2. Марки колосниковой стали и условия обжига окатышей на отечественных предприятиях горно-металлургической отрасли

№	Наименование предприятия	Марка стали	Основные условия эксплуатации
1	2	3	4
1	«ОЭМК»	Зарубежный аналог 40Х24Н12СЛ	Железорудный концентрат, до 0,1% серы
2	«Стойленский ГОК»	Зарубежный аналог 40Х24Н12СЛ	Железорудный концентрат, до 0,1% серы
3	«Высокогорский ГОК»	40Х24Н12СЛ	Железорудный концентрат, до 0,1% серы
4	«Михайловский ГОК»	40Х24Н12СЛ	Железорудный концентрат, до 0,1% серы
5	«Северный ГОК»	40Х24Н25МСЛ	Железорудный концентрат, до 0,1% серы
6	«Кольская ГМК»	75Х28Н2СЛ	Медно-никелевый концентрат, температура в зоне обжига – 900°С
7	«Лебединский ГОК»	ЧХ32	Железорудный концентрат, до 0,5% серы
8	«Костамукшинский ГОК»	ЧХ32	Железорудный концентрат, до 0,5% серы
9	«Соколовско-Сарбайский ГОК»	ЧХ32	Железорудный концентрат, до 0,5% серы
10	«Оленегорский ГОК»	ЧХ32	Железорудный концентрат, до 0,5% серы

Лебединский, Соколовско-Сарбайский, Оленегорский и Костомукшский ГОКи (пп.№7÷10 таблицы 2) перерабатывают руды с повышенными концентрациями соединений S и имеют пониженные эксплуатационные температуры, что позволяет применять чугунные колосники ЧХ32, не содержащие

никель в своём составе, рекомендованные ГОСТ 7769 – 82 «Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки» для применения в атмосфере с высоким содержанием оксидов серы (SO_2 и SO_3). Основной отрицательный фактор которых – низкая жаростойкость при температурах выше 1000°С [108], по сравнению с колосниками марки 40Х24Н12СЛ, которые способны выдерживать краткосрочные перегревы до 1250°С. Стоит отметить, что для устойчивости безникелевого сплава ЧХ32 против окисления, при температурах обжига выше 1000°С, предусматривают охлаждение окатышей паром или восстановительным газом, содержащим азот, водород, аргон в зоне рекуперации и первой зоне охлаждения, что повышает себестоимость выпускаемой продукции. При этом, очевидно, что в связи с пониженной жаростойкостью колосников из чугуна ЧХ32 – ремонты колосникового поля должны проводиться чаще, что приводит к потерям объёмов производства в связи с дополнительными остановками. Этот вывод подтверждается последними тенденциями на современных обжиговых машинах (с применением передовых в том числк иностранных технологий от поставщиков Уралмаш, Outotec, Primetals и др.): учитывая стремление всех производителей повысить производительность оборудования – чугунные колосники ЧХ32 не способны удовлетворить требованиям заказчиков – минимальная гарантированная стойкость не менее 2-х лет, при рекомендованной – 4÷5 лет. Эксплуатационный ресурс колосников из чугуна ЧЗ32 редко превышается 2 года при эксплуатации в условиях относительно щадящего теплового режима на обжиговых машинах средних и малых размеров (≥306 м^2). При этом на современных обжиговых машинах чугунные колосники не применяются вообще (не смотря на попытки их внедрить), так, в условиях АО «ОЭМК» по результатам промышленных испытаний отказались от дальнейшего опробования чугунных колосников из-за их относительно низкой жаростойкости. Таким образом, на современных обжиговых машинах чугунные колосники не применяются.

Применение безникелевых колосников обосновано в работе [35], где показаны результаты пребывания чистого никеля в атмосфере, содержащей SO_2 при 1000°С после образования защитного оксидного слоя в кислороде (пленка

оксидов никеля более плотная, чем оксидов железа). Сера проникла в оксидную пленку окалины, при этом по границам зерен обнаружена эвтектика Ni – Ni_3S_2, образующаяся при температуре 637°С, т.е. ниже, чем у матричного элемента – железа (988°С). Важно отметить, что появление такой эвтектики происходит при более низких температурах, чем температура начала окисления хрома, т.е. создания защитной хромистой окалины. Помимо окатышей, как указано ранее, серу вносит в рабочую зону обжиговой машины и природный газ. По данным работы [36] содержание серы в нем составляет 155 мг/м^3 при нормальных условиях, при этом, образовавшаяся окалина может истираться как окатышами, так и абразивом, в неочищенном потоке газов и им же уносится.

В литературных источниках по данной тематике [33÷36] не обращалось внимания на содержание серы и влияния ее совместного присутствия с никелем на коррозионную стойкость стали при высоких температурах. В ряде изобретений содержание серы не указывается совсем. Следует полагать, что этот фактор не имеет для авторов значения, а по ГОСТ 977-88 максимальное содержание серы в аустенитно-ферритных и аустенитных сталях составляет 0,04 %.

Таким образом, применение ЧХ32 обосновано на производствах с высоким содержанием серы (более 0,1%) и сравнительно низкой температурой обжига (обеспечивающей перегревы колосникового поля в пределах 1000°С). К сожалению, как описано ранее – основная тенденция всех горно-металлургических предприятий – повышение производительности, что в первую очередь достигается повышением температуры обжига, что приводит к локальным перегревам колосников до 1250°С. В современных условиях эксплуатации, чугун ЧХ32 не способен полностью заменить сталь 40Х24Н12СЛ и в случаях эксплуатации при высоких температурах – не является её аналогом.

Наиболее массово на обжиговых машинах применяют колосники из стали 40Х24Н12СЛ или её зарубежные аналоги, родственные по химическому составу (п.№ 1÷5 таблицы 2). Стоит отметить, что использование колосников от иностранных фирм продиктовано эффективностью такого бизнес-решения: отечественные колосники обладают пониженным эксплуатационным ресурсом в

сравнении с импортными, а издержки на закупку импортных колосников гораздо ниже, чем потери от простоев обжиговых машин.

Таким образом, аналогов стали марки 40Х24Н12СЛ, подходящих для замены без существенного удорожания, на отечественных предприятиях не найдено.

1.5.2 Анализ зарубежных аналогов

Основываясь на ранее изложенном, импортные колосники имеют высокую привлекательность, не смотря на высокую стоимость, в связи с чем был выполнен анализ зарубежных аналогов стали 40Х24Н12СЛ [3, 4]. Подборку см. в таблице 3, анализ выполнен по действующим национальным и международным стандартам.

По результатам анализа выполнены следующие выводы:

- Во всех сталях содержание Si (столбец 4) находится в пределах от 0,5 до 2,5 %, известно, что Si повышает жаропрочность и играет роль раскислителя, содержание Si в пределах 0,5÷2,5% благоприятно для технико-экономических показателей плавки стали 40Х24Н12СЛ и эксплуатационных характеристик;
- Содержание Mn (столбец 5) до 2,5 %, марганец вводится для удаления серы и части кислорода при плавке, также Mn аустенитообразующий элемент, что можно считать благоприятным для колосников свойством, так как уменьшит склонность к фазовым переходам во время термоциклирования, в стали 40Х24Н12СЛ содержание Mn в пределах от 0,3 до 0,8 % можно считать достаточным;
- Большинство сталей имеют ограничения по содержанию углерода по верхнему и нижнему пределу (столбец 3), можно предположить, что ограничение по нижнему пределу введено для воспроизводимости результатов термообработки, это существенное отличие от стали 40Х24Н12СЛ (аналогично для MSZ40CrNiSi25-12, BS309C3040), необходимо уточнить, что трактовать это как недостаток можно лишь в случае, если для стали предусмотрена операция термообработки;

- Ограничение по S и P (столбцы 6 и 7) идентичны и принимаются достаточными;
- Концентрация Ni в зарубежных аналогах 9÷15 % (столбец 9), чем выше концентрация Cr, тем пропорционально выше концентрация Ni, который добавлен в состав стали для повышения жаростойкости при низких температурах, а также, как аустенитообразующий элемент, компенсирующий ферритообразующее свойство хрома. В стали 40Х24Н12СЛ никель находится в пределах 11÷13%, что совпадает с зарубежными аналогами;
- Содержание Cr 22÷30 % (столбец 8), хорошо известно, что Cr основной элемент, определяющий жаростойкость, что определяет максимальную эксплуатационную температуру, в 40Х24Н12СЛ Cr находится в пределах 22÷26%, что совпадает с зарубежными аналогами;
- Наличие в импортных сталях Mo (столбец 10), в концентрациях Mo ≤ 0,5 %, может являться остатоком из-за наличие его в ломе при плавке (Mo имеет гораздо большее применение в зарубежной металлургической промышленности, чем в РФ), Mo, как и Co, повышают жаропрочность, и по некоторым данным [98], повышают стойкость к МКК понижая диффузионную подвижность в металлической решетке атомов углерода [97, 105]. Элемент является дорогостоящим и дефицитным в условиях производства колосников отечественными предприятиями, и при отсутствии достоверных данных о его влиянии на эксплуатационный ресурс колосников, нет оснований рассматривать его введение в состав стали 40Х24Н12СЛ.

Анализ показал, что зарубежные аналоги имеют близкий химический состав к стали 40Х24Н12СЛ, основные отличии – ограничения нижнего предела содержания углерода, более широкие пределы содержания Mn и Si, наличие в составе небольшого количества молибдена.

Как показано ранее, не смотря на большую стойкость импортных аналогов, они широко распространены (АО «Стойленский ГОК», АО «ОЭМК» и др.), что

объясняется их высокими эксплуатационными характеристиками, по сравнению с 40Х24Н12СЛ. Но анализ не выявил существенной разницы в химических составах.

Таблица 3. Зарубежные аналоги стали 40Х24Н12СЛ [3, 4]

Страна	Вид стандарта Марка	Концентрация элементов[1], %							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Англия	BS 309C30	≤0,5	≤2,5	≤2,0	≤0,05	≤0,05	22,0-27,0	10,0-14,0	≤1,5
Венгрия	MSZ 40CrNiSi25-12	≤0,4	0,5-1,5	0,3-0,8	≤0,035	≤0,03	22,0-26,0	11,0-13,0	-
Германия	DIN, WNr 1.4826, 1.4837, G-X40CrNiSi22-9, G-X40CrNiSi25-12	 0,3-0,5 0,3-0,5 0,3-0,5 0,3-0,5	 1,0-2,5 1,0-2,5 1,0-2,5 1,0-2,5	 ≤2,0 ≤2,0 ≤1,5 ≤2,0	 ≤0,04 ≤0,04 ≤0,035 ≤0,04	 ≤0,03 ≤0,03 ≤0,03 ≤0,03	 21,0-23,0 24,0-27,0 21,0-23,0 24,0-27,0	 9,0-11,0 11,0-14,0 9,0-11,0 11,0-14,0	 ≤0,5 ≤0,5 ≤0,5 ≤0,5
Евросоюз	EN 1.4837, GX40CrNiSi25-12	 0,3-0,5 0,3-0,5	 1,0-2,5 1,0-2,5	 ≤2,0 ≤2,0	 ≤0,04 ≤0,04	 ≤0,03 ≤0,03	 24,0-27,0 24,0-27,0	 11,0-14,0 11,0-14,0	 ≤0,5 ≤0,5
Италия	UNI GX35CrNi25-12	0,25-0,45	1,0-2,5	≤2,0	≤0,04	≤0,03	24,0-27,0	11,0-14,0	≤0,5
Китай	GB ZG35Cr26Ni12	0,2-0,5	≤2,0	≤2,0	≤0,04	≤0,04	22,0-26,0	11,0-14,0	≤0,5
Польша	PN LH23N18C[2]	≤0,2	1,5-2,5	≤2,0	≤0,045	≤0,015	19,0-21,0	11,0-13,0	-
Румыния	STAS T35NiCr260	0,3-0,4	1,0-2,0	≤1,5	≤0,035	≤0,03	24,0-28,0	13,0-15,0	-
США	HF, HH J 93503, J 94003, J 94013	 0,2-0,5 0,2-0,5 0,3-0,4	 ≤2,0 ≤2,0 0,5-2,0	 ≤2,0 ≤2,0 ≤1,5	 ≤0,04 ≤0,04 ≤0,04	 ≤0,04 ≤0,04 ≤0,04	 24,0-28,0 26,0-30,0 26,0-30,0	 11,0-14,0 14,0-18,0 14,0-18,0	 ≤0,5 ≤0,5 ≤0,5
Франция	AFNOR Z40CN25-12[3]	0,3-0,5	≤2,0	≤2,0	≤0,04	≤0,03	23,0-26,0	12,0-14,0	-
Чехия	CSN 422934, 422936	 0,3-0,5 0,3-0,5	 1,0-2,5 1,0-2,5	 ≤2,0 ≤2,0	 ≤0,04 ≤0,04	 ≤0,03 ≤0,03	 21,0-23,0 24,0-27,0	 9,0-11,0 11,0-14,0	 ≤0,5 ≤0,5
Юж. Корея	KS HRSC13A[4], HRSC17, SSC17	 0,25-0,5 0,2-0,5 ≤0,2	 ≤1,75 ≤2,0 ≤2,0	 ≤2,5 ≤2,0 ≤2,0	 ≤0,04 ≤0,04 ≤0,04	 ≤0,04 ≤0,04 ≤0,04	 23,0-26,0 26,0-30,0 22,0-26,0	 12,0-14,0 8,0-11,0 12,0-15,0	 ≤0,5 ≤0,5 -
Япония	JIS SCH12, SCH13A[5], SCH17, SCS17	 0,2-0,4 0,2-0,5 0,2-0,5 ≤0,2	 ≤2,0 ≤1,75 ≤2,0 ≤2,0	 ≤2,0 ≤2,5 ≤2,0 ≤2,0	 ≤0,04 ≤0,04 ≤0,04 ≤0,04	 ≤0,04 ≤0,04 ≤0,04 ≤0,04	 18,0-23,0 23,0-26,0 26,0-30,0 22,0-26,0	 8,0-12,0 12,0-14,0 8,0-11,0 12,0-15,0	 ≤0,5 ≤0,5 ≤0,5 -

1.5.3 Анализ сталей и сплавов из литературных источников

Жаростойкие стали по ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные» [37] обладают стойкостью в

[1] Во всех сталях и сплавах железо – остальное.
[2] Содержит N ≤ 0,11%.
[3] Содержит W ≤ 5,0% и Nb ≤ 1,5%.
[4] Содержит N ≤ 0,2%.
[5] Содержит N ≤ 0,2%.

нагруженном состоянии при t ≥ 550°C в агрессивных газовых средах против химического разрушения.

Жаростойкие стали должны соответствовать большому комплексу требований: достаточную технологичность, свариваемость (при изготовлении проката), достаточный уровень жаропрочности, поскольку испытывают воздействие механических напряжений [38].

Для колосников обжиговых тележек критерии жаропрочности и высокой технологичности имеют малую степень важности. Ранее были описаны характеристики процесса эксплуатации колосников, из описания следует вывод, что колосники обжиговых тележек, при нормальных условиях эксплуатации, не испытывают высоких напряжений и не нуждаются в повышенной жаропрочности. Помимо этого, деталь литая и сварке или механической обработке (кроме возможной шлифовки участков прибыли) не подвергается. Основными параметрами, определяющими эксплуатационный ресурс колосников, будут: жаростойкость, сопротивляемость МКК и в меньшей степени трещинообразованию.

Сопротивляемость МКК определяется химическим составом стали и технологией получения детали, в то время как сопротивляемость короблению и трещинообразованию в большей степени определяется технологией получения детали – в первую очередь отсутствием литейных дефектов (усадочных раковин) в теле детали. Таким образом, анализируя только марочный состав сплавов, без учета технологии обработки детали после литья, подбирать аналог следует по критерию жаростойкости.

Жаростойкость оценивается скоростью окисления в мм/год, что является выражением скорости потери массы:

$$жс = (\Delta q/\gamma*10^3)*8,7, \quad (10)$$

где: Δq – скорость потери массы, г/(м²·ч);

γ – плотность стали, кг/м³.

Жаростойкость определяется свойствами оксидных защитных плёнок, образующихся при эксплуатации. Определяющий параметр в этом случае –

сплошность плёнки, что обеспечивает низкую диффузионную проницаемость для ионов кислорода в направлении к поверхности раздела металл-окалина и ионов компонентов сплава к поверхности окалина-газовая среда, а также хорошая адгезия окалины с металлом [105].

На жаростойкость влияет как состав стали, так и агрессивность эксплуатационной среды (её температуры, состава, давления, продолжительности воздействия и др.).

Как отмечено ранее, жаростойкость, в основном, определяется концентрациями Cr и Ni, образующих оксидные плёнки Cr_2O_5, шпинели $NiO*Cr_2O_3$ и (Fe, Ni)*O*(Cr, Fe)*2*O_3 [38].

Анализ жаростойких сталей, наиболее часто применяемых на сегодняшний день, выполнен по данным ГОСТ 5632-72 [37] и ГОСТ 977-88 [2]. В анализе (таблица 4) учтены только те аналоги, которые могут эксплуатироваться при повышенных температурах (не менее 1000 ºС).

Таблица 4. Марки жаростойких сталей и сплавов и рекомендованные условия эксплуатации по ГОСТ 5632-72 и ГОСТ 977-88

№ п/п	№ стандарта и класс	Марка стали	Максимальная рекомендованная температура эксплуатации, ºС	Назначение
1	2	3	4	5
1	ГОСТ 5632-72 жаростойкие стали и сплавы II группы	20Х23Н13	1000	Изготовление труб для пиролиза метана и пирометрических трубок
2		36Х18Н25С2	1000	Изготовление печных конвейеров и других нагруженных деталей
3		20Х23Н18 10Х23Н18	1000	Изготовление труб и деталей установок для конверсии метана, пиролиза, листовых деталей, трубы, арматура
4	ГОСТ 5632-72 жаропрочные стали и сплавы III группы	ХН38ВТ	1000	Детали газовых систем
5		ХН28ВМАБ	1000	Листовые детали турбин
6		ХН60ВТ	1000	Листовые детали двигателя и турбин
7		12Х25Н16Г7АР	1050	Детали газопроводных систем, изготавливаемых из тонких листов, ленты, сортового проката
8		20Х25Н20С2	1050	Подвески и опоры в котлах, трубы электролизных и пиролизных установок
9		ХН75МБТЮ	1050	Детали газопроводных систем, аппаратура

№ п/п	№ стандарта и класс	Марка стали	Максимальная рекомендованная температура эксплуатации, ºС	Назначение
1	2	3	4	5
10		ХН78Т	1000	Жаровые трубы
11			1100	Детали газопроводных систем, сортовые детали, трубы
12		ХН70Ю	1100	Листовые детали, газопроводы, работающие при умеренных напряжениях
13			1200	Детали газопроводных систем
14		ХН60Ю	1100	Листовые детали турбин, работающие при умеренных напряжениях
15			1200	Детали газопроводных систем, аппаратура
16		ХН45Ю	1300	Детали горелочных устройств, чехлы термопар, листовые и трубчатые детали печей
17	ГОСТ 977-88 жаростойкие стали и сплавы	08Х17Н34В5Т3Ю2РЛ	1000	Сопловые и рабочие лопатки газовых турбин, цельнолитые роторы (рекомендована для эксплуатации при температурах до 800 ºС)
18		20Х20Н14С2Л	1050	Печные конвейеры, шнеки для цементации и другие детали, работающие при высоких температурах в нагруженном состоянии
19		15Х25ТЛ	1100	Детали не подвергающиеся действиям постоянных и переменных нагрузок, (химическое машиностроение), печная арматура, плиты
20		20Х25Н19С2Л 18Х25Н19СЛ	1100	Роторы для отжига, части печей и ящики для цементации, детали паровых и газовых турбин, котельных установок, лопаток и венцов компрессоров и сопловых аппаратов турбин
21	ГОСТ 977-88 жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы	15Х18Н22В6М2РЛ	1000	Детали двигателей авиационной промышленности (рабочие и сопловые лопатки газовых турбин)
22		20Х21Н46В8РЛ	1000	Детали двигателей авиационной промышленности (рабочие и сопловые лопатки газовых турбин)
23		35Х23Н7СЛ	1000	Детали трубчатых печей нефтезаводов, рекомендована для замены стали марки 40Х24Н12СЛ при температурах эксплуатации до 1000 ºС
24		35Х18Н24С2Л	1200	Детали, работающие при высоких температурах в сильно-нагруженном состоянии

Из дальнейшего анализа были исключены безникелевые стали с 20-25 % Cr и стали с высокими концентрациями Ni, первые так как имеют низкую, по сравнению с 40Х24Н12СЛ жаропрочность при высоких температурах эксплуатации, а вторые гораздо выше себестоимость в связи с высокой стоимостью Ni (рекомендованы для применения в авиационной и ракетно-космической технике [38]).

Таким образом, все стали содержащие в своём составе большее количество никеля, по отношению к стали 40Х24Н12СЛ будут иметь большую себестоимость, при том, что в большей части свойств таких сталей (таких как жаропрочность, свариваемость, технологичность и другие) нет необходимости при применении их в качестве колосников обжиговых тележек. Все стали и сплавы, имеющие в своём составе более 18 % никеля (что на 33 % больше чем в стали 40Х24Н12СЛ), не подходят в роли аналога из-за большей себестоимости.

Исключив сплавы с высоким содержанием никеля, возможно проанализировать оставшиеся (таблица 4):

- 20Х23Н13 (п.1 таблицы 4) – сталь хромоникелевого класса, очень близка по химическому составу к стали 40Х24Н12СЛ, пониженное количество углерода в стали приведет к смещению аустенитно-ферритного баланса в сторону увеличения количества феррита, также, в условиях науглероживающей среды сталь может быть склонна к МКК, помимо этого, нижний предел углерода в стали отсутствует, что можно считать недостатком при условии, что сталь подвергается термообработке. Также, в стали нет кремния, что понизит износостойкость, в следствии чего могут возникнуть проблемы с абразивным истиранием поверхностей в следствии прососа неочищенного газа и контакта с окатышами, понижение содержания хрома не целесообразно, т.к. хром основной элемент определяющий жаростойкость [38]. Сталь 20Х23Н13 не подходит для замены стали 40Х24Н12СЛ;
- 12Х25Н16Г7АР (п.7 таблицы 4) – по аналогии с предыдущим примером, низкое содержание углерода может привести к науглероживанию и протеканию МКК, очевидно, что марганец введён как аустенитообразующий элемент для экономии никеля, такое решение плохо скажется на жаростойкости стали (т.к. никель повышает жаростойкость) и на износостойкости – марганец уменьшит твёрдость стали, данная марка стали более применима для

изготовления катанных деталей [37] и не подходит для замены стали 40Х24Н12СЛ;

- 20Х20Н14С2Л (п.18 таблицы 4) – по аналогии, пониженное количество углерода в стали приведет к смещению аустенитно-ферритного баланса в сторону увеличения количества феррита, понижение содержания хрома на 4 % приведёт к снижению жаростойкости при высоких температурах, а повышения содержания никеля к удорожанию стали, очевидно, что марка стали имеет хорошие эксплуатационные характеристики при температурах эксплуатации до 1000ºС, но при повышенных температурах эксплуатироваться не может вследствие пониженной окалиностойкости (как доказано ранее, колосники подвергаются кратковременной эксплуатации при температурах до 1250 ºС), ввиду чего, данная марка стали не подходит для замены стали 40Х24Н12СЛ;
- 15Х25ТЛ (п.19 таблицы 4) – жаростойкая марка стали с достаточно низким содержанием углерода (про негативное влияние низкого содержания которого сказано в предыдущих марках) и отсутствием никеля, данная сталь не может эксплуатироваться в условиях высоких температур (более 1100 ºС) в нагруженном состоянии [2], отсутствие в химическом составе стали никеля приведёт как к понижению себестоимости так и к понижению жаростойкости, которое не компенсируется столь малым повышением содержания хрома (на 1%), при этом, нужно учитывать тот факт, что жаростойкость возрастает нелинейно повышению содержания хрома. Применение такой стали для изготовления колосников может привести к их повышенному выходу из строя по угару поверхности, в следствии циклического воздействия температур и нагрузок, данная марка стали не подходит для замены стали 40Х24Н12СЛ;
- 35Х23Н7СЛ (п.23 таблицы 4) – сталь является аналогом и заменителем стали марки 40Х24Н12СЛ для менее агрессивных условий

эксплуатации (температура менее 1000 ºС), пониженное содержание хрома и никеля делают невозможным применение данной марки стали в обжиговых машинах при современных эксплуатационных условиях [2].

В результате анализа данных ГОСТ 5632-72 [37] и ГОСТ 977-88 [2] сталь, подходящая для замены стали 40Х24Н12СЛ – не выявлена.

Выполнен анализ потенциальных аналогов стали 40Х24Н12СЛ (или её модификаций) из научной литературы [39÷55].

Сталь [39], эксплуатируемая в диапазоне t от 1000 до 1100°С, выдерживающая циклические термонагрузки в агрессивных средах. Авторы добивались повышения жаропрочности, жаростойкости и термостойкости по предпосылкам [96]. По результатам лабораторных исследований ресурса колосников вырос в 1,5 раза. Состав стали, % масс.: 0,25÷0,50 C; 23,0÷28,0 Cr; 10,0÷14,0 Ni; 0,5÷1,2 Mn; 1,0÷ 2,0 Si; 0,12÷0,23 N; 0,001÷0,005 B; 0,2÷0,5 Mo; 0,06÷4,0 Aℓ; 0,005÷0,2 Zr; 0,001÷0,2 Ca; 0,005÷0,1 РЗМ; железо – остальное. Недостатками стали являются: присутствие B, большое содержание N, большое количество модифицирующих элементов, слишком широкий диапазон содержания Al (стали с 0,06 и 4 % Al будут сильно отличаться по свойствам) [99÷102]. Плюсом можно считать ограничение содержания углерода при условии применения термообработки. Сталь имеет большую стоимость по сравнению с 40Х24Н12СЛ и не имеет достоверных доказательств заявленных свойств.

Стали для термоагрегатов [40] состава, % масс.: 0,20÷0,45 C; до 23,0-26,0 Cr; 11,0÷13,0 до 0,8 Mn; Ni; до 1,5 Si; 0,4÷0,8 Nb; 0,25÷0,45 V; до 0,030 S; до 0,030 P. Авторы применили Nb и V для повышения предела текучести [40]. Нет нижнего предела по концентрациям Si и Mn, что не однозначно, так как Si и Mn при совместном вводе являются раскислителями. Плюсом стали является нижнее ограничение содержания углерода. Также очевидна большая стоимость в сравнении с 40Х24Н12СЛ при идентичной жаростойкости (так как содержание основных элементов, определяющих жаростойкость – Cr и Ni [38] осталось без изменений, по отношению к базовой стали 40Х24Н12СЛ).

Известна модификация базовой стали с добавкой Ga для повышения механических свойств (и противарадиационных) [41]. Состав стали, % масс.: 0,2÷0,6 C; 0,8÷1,5 Si; 0,4÷1,0 Mn; 22,0÷25,0 Cr; 12,0÷15,0 Ni; 0,10÷0,25 Ga. Сталь получала высокую себестоимость по сравнению с базовой ввиду использования дорогостоящего Ga и повышения концентраций Cr и Ni при наличии свойств, в которых нет потребности при изготовлении колосников, что повысит себестоимость детали по сравнению с базовой без повышения основных свойств. Отсутствие нижнего содержание углерода не позволит производить воспроизводимую по результатам термообработку.

Сталь цепей клинкера [42], % масс.: 0,25÷0,45 C; 1,5÷2,5 Si; 6,0÷8,0 Mn; 25,0÷27,0 Cr; 12,5÷14,5 Ni; 0,3-0,6 Aℓ; 0,25-0,40 Nb; 0,15÷0,30 Cu; 0,15÷0,30 N; 0,008÷0,015 B; 0,15÷0,25 V; 0,005÷0,015 Ca. Авторы достигают повышенной износостойкости, жаростойкости (при t=1150°C), механических свойств [42]. Повышение последних двух свойств колосникам не требуется. Анализируя химический состав можно предположить, что повышенное содержание Cr и Ni необходимо из-за добавления Mn, снижающего жаростойкость [38]. Больший, по сравнению с базовой, комплекс дополнительных легирующих элементов, введенных для не требуемых от колосников свойств, значительно повысят себестоимость стали.

Литые комплектующие термических агрегатов также изготавливают из жаростойких сталей (таблица 5) [43].

Пп.№1,2 (таблица 5) не покажут требуемого уровня жаростойкости из-за пониженного Cr [38]. В сталях пп.№3,4 (таблица 5) совместно присутствуют N и повышенный Si, что при низком Ni негативно скажется на термостойкости [38]. Условия эксплуатации приведенных сталей не подразумевают термоциклирование, а работу при длительных выдержках в нагретой атмосфере. Низкое содержание углерода является недостатком, при применении сталей для колосников, из-за смещения аустенитно-ферритного баланса в сторону феррита. При этом низкое содержание углерода приведет к повышению себестоимости.

Таблица 5. Содержание элементов в жаростойких сталях[6]

№ пп.	Сталь	C	Mn	Si	Cr	Ni	N
1	10Х14Н7АЛ	0,07÷0,14	1,0÷2,0	0,2÷1,0	13÷15	5÷8	0,15÷0,30
2	10Х18Н6АЛ	0,07÷0,14	1,0÷2,0	0,2÷1,0	17÷20	5÷7	0,20÷0,35
3	15Х20Н10АЛ	до 20	1,0÷2,0	2,0÷3,0	19÷22	8÷11	0,20÷0,35
4	15Х25Н12АЛ	до 20	0,2÷1,5	2,0÷3,0	23÷27	12÷15	0,25÷0,45

Авторы [44] выполнили исследования, направленные на определение жаростойкости ряда применяемых сталей в сравнении с ими предложенной сталью – 100Х28НСТЛ, назначение изобретения – комплектующие агломашин. Содержание элементов предлагаемой стали было следующим, % масс.: 0,89-C; 28,10-Cr; 1,30-Si; 0,90-Ni; 0,88-Mn; 0,25-Ti; 0,008-S; 0,020-P. Повышение содержания C более чем в два раза и Cr на 2%, введение Ti – резко повысят себестоимость стали и повысят механические свойства и жаропрочность. Вопросы вызывают и результаты испытаний на жаростойкость, после выдержки при температуре 1000°C на протяжении 100-а часов показаны следующие данные [44]:

35Х18Н24С2Л – 0,0054 г/(м^2*ч);

35Х23Н7СЛ – 0,0028 г/(м^2*ч);

40Х24Н12СЛ – 0,0057 г/(м^2*ч);

100Х28НСТЛ- 0,0021 г/(м^2*ч).

По этим данным, в равных условиях, стали с большим содержанием Cr и Ni показали ниже жаростойкость. Предложенная сталь не подходит для замены 40Х24Н12СЛ.

Известно исследование о влиянии модифицирующих добавок в сталь 40Х24Н12СЛ на жаростойкость [45]. Испытания на протяжении 100-а ч при

[6] Во всех сталях содержалось до 0,030 % серы и до 0,035 % фосфора

t=900°C показали, что Ti и B повышают, а Ce и Ca – снижают жаростойкость. Цель разработанной стали 35Х22Н10СТРЛ – изготовление массивных «сердечников» (0,5-3,2 т), применяемых для при t ≤ 1000°C. Новая сталь показала повышенные эксплуатационные свойства по сравнению базовой, что достигается введением в расплав модификаторов (0,15÷0,25 %) Ti + (0,005÷0,10 %) РЗМ при t расплава 1515÷1530 °C. Предполагается, что это позволило уменьшить размеры первичных карбидов. Достоверных доказательств возрастания жаростойкости по отношению к базовой марке стали не предоставлено, при очевидном удорожании производства такой марки стали.

Модифицирование РЗМ было применено авторами [46] на стали для изготовления колосников для агломашин, марка: 30Х24Н12СЛ. Положительное влияние указанных концентраций РЗМ на свойства стали, которые не являются основными (в первую очередь, это механические свойства), в случае с колосниками, очевидно, как и удорожание стали в случае применения РЗМ. В связи с чем, принято, что введение в сталь 40Х24Н12СЛ РЗМ вызовет необоснованное удорожание себестоимости производства.

В работе [47] достигают двукратного увеличения срока службы высоколегированной проволоки добавкой 0,2% металлов группы Ce. Следует отметить, что данные работ [45] и [47] нельзя сравнивать с базовой маркой стали, т.к. сварка с присутствием легкоокисляющихся элементов производится в защитной атмосфере.

Известны жаростойкие стали с более низким, чем у стали 40Х24Н12СЛ, содержанием никеля. Составы таких жаростойких сталей приведены в таблице 6.

В стали [48] высокое содержание кремния, а также присутствует титан. Эти элементы способствуют интенсивному образованию карбидов уже при кристаллизации стали после литья. Содержание никеля слишком низкое для эксплуатации деталей при 950°C и выше. Гадолиний редкий и дорогостоящий элемент. Он относится к группе лантаноидов и, очевидно, его можно заменить другими, более распространенными лантаноидами. Алюминий легкоокисляющийся элемент. Присутствия в жидкой стали алюминия в таком

большом количестве приводит к образованию плен. Сталь будет насыщена неметаллическими включениями, снизится ее жидкотекучесть, при этом приходится повышать температуру заливки, что усложнит технологию разливки и увеличит издержки на производство. Очевидно, сталь не подходит для изготовления колосников.

Таблица 6. Содержание химических элементов в жаростойких сталях[7] [48, 49]

Ист.	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Aℓ	Ta	Cu	Ca	Nв	Ge	Gd
[48]	0,3 - 2,6	0,3 - 1,2	24,0 - 28,0	1,5 - 5,5	0,10 - 0,15	1,5 - 2,7	-	-	-	-	-	0,1 - 0,2
[49]	0,5 - 1,2	0,6 - 1,2	21,0 - 25,0	6,0 - 8,0	0,005 - 0,040	0,005 - 0,150	0,005 - 0,025	0,25 - 0,80	0,005 - 0,020	0,005 - 0,050	0,005 - 0,150	-

В стали [49] содержание хрома для эксплуатации при температурах в интервале 1000÷1250°C низкое. Алюминий в пределах 0,02÷0,06 % является раскислителем (до 0,15%), а при больших концентрациях – легирующим элементом [60]. Поэтому приведение в таких приделах содержание алюминия является некорректным, так как при min% и max% Al свойства стали будут различаться. К недостаткам стали следует отнести большое количество модифицирующих добавок, выполняющих схожие функции. Присутствие меди при температурах эксплуатации более 1000°C нежелательно. При температурах выше температуры плавления меди (1084°C) выделяется новая жидкая медьсодержащая фаза по границам зерен ввиду того, что медь не растворяется в железе. Никель растворяет медь и затрудняет ее выделение в жидком виде к поверхности сплава. Здесь возможно образование и выделение твердой фазы Cu-Ni [35]. Так как сильные потоки газа разрушают образующийся на поверхности металла видоизмененный слой, то контакт обогащенной никелем фазы с газовой фазой приведет к усиленной

[7] Содержание углерода в сталях [48] и [49] 0,2÷0,5 % и 0,25÷0,45 % соответственно

коррозии металла. Следует также отметить отсутствие данных по содержанию серы. Очевидно, ее содержание находится в пределах данных ГОСТа 977-88, т.е. до 0,03%. Ввиду высокой себестоимости стали, спорного химического состава и отсутствия достоверных доказательств повышенной жаростойкости, по сравнению с базовой маркой стали 40Х24Н12СЛ, описанная сталь не подходит для замены базовой.

Известна жаростойкая сталь 30Х23АН6СТЮЛ [48] (химический состав не показан, заявка на изобретение не подавалась). Введение N из расчета замены 1 % Ni на 0,020÷0,025% N показало повышенную жаростойкость к базовой при содержании N 0,15%. Также сталь дополнительно обрабатывали ЩЗМ (Ca, Ba) и применяли в малых количествах добавки (Ti, Aℓ, B). Очевидна высокая себестоимость предложенной стали при спорных результатах испытаний. Так, одновременное присутствие в стали N и Ti делает не целесообразным введение последнего – дорогостоящий титан уйдет в нитриды [99÷102]. Также, предполагаемая высокая температура разливки предлагаемой стали (1650°С) приведет к повышению угара элементов и повысит склонность к дефектообразованию при лить (например, к образованию раковин). Описанная марка стали не подходит для замены базовой.

Авторы [49] доказывают, литая сталь (% масс.): 0,50-C; 23-Cr; 6,5-Ni; 1,5-Si подходит для изготовления жаростойких комплектующих, эксплуатируемых в восстановительной атмосфере при $t \leq 1000$°С. Очевидно, что при высоких температурах эксплуатации её жаростойкость будет ниже, чем у базовой, что является основным минусом – экономия на лигатуре не покроет издержки и недополученную прибыль при остановках производства для замены колосников. Описанная сталь не является аналогом стали 40Х24Н12СЛ, при условии применения в области высоких температур (1000÷1250°С).

ГОСТ 2176-76 «Отливки из высоколегированной стали со специальными свойствами. Общие технические условия» предлагает жаростойкие до 1150°С, стали 15Х25ТЛ, 75Х28Л, 185Х34Л. В условиях работы при интенсивных теплосменах в обжиговых машинах ферритные стали будут склонны к

трещинообразованию ввиду их хрупкости, что объясняется карбидообразованием. Отсутствие Ni не позволит достичь жаростойкости базовой стали. Стали не подходят для замены 40Х24Н12СЛ.

Существует сталь 30Х24Н12СЛ (ГОСТ 2176-67), модифицированная церием [46]. Эксплуатационный ресурс колосников был повышен в среднем на 25 % при оптимальном остаточном содержании церия в стали 0,025÷0,035 %. Достоверно не доказано, что повышенная стойкость колосников связана с введением РЗМ. При этом, применение церия позволило компенсировать снижение жидкотекучести стали в связи с уменьшением содержания углерода. К недостаткам стали следует отнести увеличение себестоимости при спорных результатах. Стоит отметить, что углерод в стали остался не ограниченным по нижнему пределу, что можно считать минусом, так как это определяет воспроизводимость результатов термообработки и влияет на аустенитно-ферритный баланс.

Касательно попыток присадки и добавки в сталь модификаторов и легирующих элементов:

- В работе [50] экспериментальным путем установлены температуры плавления окалины 16 различных легированных марок сталей. Отмечено, что кремний и медь способствуют снижению температуры плавления окалины при температурах более 1200°С. Медь снижает температуру плавления окалины на величину 2÷3° С на каждые 0,1 % ее содержания. Марганец практически не влияет на температуру плавления окалины в присутствии хрома, никеля, алюминия. Так, стали марок 10кп и 45Г17Ю3 с содержанием соответственно 0,3 и 16-17 % Mn имеют близкие температуры плавления окалины, однако во второй стали содержится 3,27% Aℓ и 0,5% Ni. Вводить медь в сталь 40Х24Н12СЛ не целесообразно.
- Присутствие в составе стали более 1% марганца связано с гарантированным снижением содержания серы менее 0,025 %. При получении стали в кислой печи ферромарганец возможно присаживать в сталь непосредственно перед выпуском плавки. Марганец связывает

серу в тугоплавкий сульфид марганца, который переходит в шлак. Марганец стабилизирует аустенит повышая аустенитно-ферритный баланс. Увеличение содержания марганца более 2% будет повышать усадку стали и увеличит интервал ее кристаллизации при этом эффективность десульфурации не изменится. Увеличение содержания марганца в стали 40Х24Н12СЛ не целесообразно.

- Присутствие в стали остаточного кальция свидетельствует о значительном снижении в ней содержания кислорода. По данным работы [51] добавка кальция в высоколегированные хромоникелевые стали не привела к существенному изменению содержания серы и фосфора. Процесс десульфурации стали значительно усложняется тонкодисперсностью образующихся в ней сульфидов, трудноудаляемых из расплава. Общее количество неметаллических включений в стали при вводе 0,05÷0,10% кальция уменьшается на 40÷50 %. Раскисление стали силикокальцием приводит к офлюсовыванию сульфида образующимся кремнеземом и ускорению всплывания данных частиц. Однако, главная цель ввода в сталь кальцийсодержащего раскислителя - это снижение содержания в ней кислорода.
- В работе [52] отмечено, что добавка РЗМ позволила снизить содержание никеля в стали Х18Н9Т на 1% без ухудшения пластичности. Влияние на жаростойкость не раскрыто, ввод РЗМ не обоснован.

Таблица 7. Данные после испытаний на жаростойкость

№ п/п	Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	$\Delta m^{800}/\Delta m^{1000}$, г·(м^2·ч)	L^{800}/L^{1000}, %
1[8]	12Х17Л	0,12	0,80	0,8	17	-	0,016/1,800	0,10/1,12
2[9]	40Х24Н12СЛ	0,40	0,70	0,6	24	12,0	0,030/0,060	0/0,01
3[10]	75Х24ТЛ	0,75	0,60	0,8	24	0,5	0,040/0,080	0,04/0,15

[8] Содержание меди: менее 0,3% Cu
[9] Содержание серы и фосфора: 0,01% S, 0,03% P
[10] Содержание титана: 0,25% Ti

Таблица 8. Результаты исследований металлографии

Сталь	Феррит,%	Аустенит,%	$(Fe, Me)_3C$, %
12Х17Л	84,57	10,28	5,15
40Х24Н12СЛ	10,87	82,4	6,73
75Х24ТЛ	89,80	2,90	7,30

В работе [53] проанализированы эксплуатационные характеристики 3-х марок сталей, считавшихся наиболее часто используемыми. Все стали были исследованы на жаростойкость при температурах 800 и 1000°С. Химические составы и данные исследований представлены в таблице 7, результаты рентгеноструктурного исследования на карбиды $(Fe,Me)_3C$ в таблице 8 [53].

Отмечено, что при температурах до 800°С требования по жаростойкости выполнялись. Жаростойкость ($k_{окалиностойкости}$) Δm^{800} составлял 0,016-0,05 г/(м^2*ч). Так-же авторы отмечают, что рост карбидной фазы понижает жаростойкость, особенно это выражено при ферритной структуре [53].

В работе [54] предлагается заменить сталь марки 40Х24Н12СЛ на чугун марки ИЧ240Х20Ю2Б2НТ, жаростойкость которого достаточна условии $t \leq 1000$°С. Чугун разработан, в основном, как жаропрочный материал, следует также отметить что он не пригоден для эксплуатации при температурах выше 1000°С, так как имеет в своем составе не достаточное количество хрома [22].

Выполненные изыскания успешных аналогов и модификаций стали 40Х24Н12СЛ показали их отсутствие (за исключением импортных). Успешные и наиболее массово применяемые зарубежные аналоги стали 40Х24Н12СЛ, имеют практически идентичный химический состав (как в случае со сталью 1.4837, GX40CrNiSi25-12, применяемой Outotec). Очевидно, что марка стали подобрана оптимально даже при современном, более агрессивном, эксплуатационном режиме. Таким образом, наиболее перспективным является установление истинных причин и механизмов преждевременного разрушения колосников из стали 40Х24Н12СЛ и модернизация технологии их изготовления по пути увеличения их стойкости и эксплуатационного ресурса.

1.6 Технология выплавки стали 40Х24Н12СЛ

Основные параметры плавки стали 40Х24Н12СЛ аустенитно-ферритного класса определяются исходя из технико-экономической целесообразности применяемого оборудования и мощностей. По ГОСТ 977-88 отливка относится к 13-му классу точности (не требуется проверка физико-механических свойств, выполняется проверка только химического состава). На сегодняшний день, оптимальнее производить процесс выплавки стали в индукционных печах с нейтральной или основной футеровкой.

Применяемая ёмкость индукционной печи – 2 т., тип печи ИСТ-2,0/1,0 средней частоты (характеристики см. п.7 таблицы 11). Печь является частью плавильного комплекса, состоящего из: 2-ух индукционных печей работающих от одного трансформатора и двух конденсаторных батарей и 2-ух тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ). Плавильный комплекс позволяет работать печам одновременно: для поддержания температуры металла перед разливкой, и для ведения процесса плавки.

Таблица 9. Параметры легированных лома и отходов категории Б28

Обозначение группы	Наименование группы	Стали группы	Содержание элементов, %	Стандарт
1	2	3	4	5
Б28	Лом и отходы жаростойких и жаропрочных хромоникелевых сталей с высоким содержанием хрома и никеля	20Х23Н18 (Х23Н18, ЭИ417), 10Х23Н18 (0Х23Н18), Х25Н20, 20Х25Н20С2 (Х25Н20С2, ЭИ288)	Ni 17,0-21,0; Cr 22,0-27,0; P ≤ 0,035	ГОСТ 2787-75 «Металлы черные вторичные. Общие технические условия»

Выплавка стали осуществляется путем переплава возвратного лома (литниково-питающая система после обрезки), лома Б28 (см. таблицу 9) и ферросплавов: феррохрома низкоуглеродистого ФХ025 (пп.№1,2 таблицы 10), ферросиция ФС45 (п.№3 таблицы 10), ферромарганца малоуглеродистого ФМн80

(пп.№4÷7 таблицы 10) и в случае отсутствия лома Б28 – никеля Н-3 (п.№8 таблицы 10).

Угар элементов металла в индукционной печи ИСТ-2,0/1,0 составляет ≤3,6%, безвозвратные потери по остальным переделам (обрезка, заточка, термообработка и др.) составляет ≤3%, итого, безвозвратные потери составляют 6,4%.

Таблица 10. Химический состав компонентов плавки (ферросплавов)

<table>
<tr><th rowspan="2">№ пп</th><th rowspan="2">Марка</th><th colspan="8">Химический состав, %</th><th rowspan="2">Стандарт</th></tr>
<tr><th>Cr</th><th>Ni</th><th>C</th><th>Si</th><th>P</th><th>S</th><th>Al</th><th>Mn</th></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td></tr>
<tr><td>1</td><td>ФХ025А</td><td rowspan="2">≥65,0</td><td>-</td><td rowspan="2">0,25</td><td rowspan="2">2,0</td><td>0,03</td><td rowspan="2">0,02</td><td rowspan="2">-</td><td rowspan="2">-</td><td rowspan="2">ГОСТ 4757-91 «Феррохром. Технические требования и условия поставки»</td></tr>
<tr><td>2</td><td>ФХ025Б</td><td>-</td><td>0,05</td></tr>
<tr><td>3</td><td>ФС45</td><td>0,5</td><td>-</td><td>0,20</td><td>41÷47</td><td>0,05</td><td>0,02</td><td>2,0</td><td>1,0</td><td>ГОСТ 1415-93 «Ферросилиций. Технические требования и условия поставки»</td></tr>
<tr><td>4</td><td>FeMn80C05</td><td rowspan="4">-</td><td rowspan="4">-</td><td rowspan="2">0,1÷0,5</td><td rowspan="4">2,0</td><td>0,30</td><td rowspan="4">0,30</td><td rowspan="4">-</td><td rowspan="4">75÷85</td><td rowspan="4">ГОСТ 4755-91 «Ферромарганец технические требования и условия поставки»</td></tr>
<tr><td>5</td><td>FeMn80C05LP</td><td>0,15</td></tr>
<tr><td>6</td><td>FeMn80C01</td><td rowspan="2">до 0,1</td><td>0,30</td></tr>
<tr><td>7</td><td>FeMn80C01LP</td><td>0,15</td></tr>
<tr><td>8</td><td>Н-3</td><td>-</td><td>≥98,6 (в сумм с Co не более 0,7)</td><td>0,10</td><td>-</td><td>-</td><td>0,03</td><td>-</td><td>-</td><td>ГОСТ 849- 97 «Никель первичный. Технические условия»</td></tr>
</table>

В условиях плавки в индукционных печах с нейтральной футеровкой шлак наводится для защиты зеркала металла, для этого оптимально применять флюс «перлит» (перлитовых пород вулканического происхождения) с размером фракции 0,63÷3мм. Состав: SiO_2 – 73-75%, Al_2O_3 – 11-13%, H_2O ≤ 5%. Основное свойство флюса - способность к увеличению объёма при нагреве до 1200°С и последующая адсорбция (склеивание или коагулирование) шлака и остатков модификаторов, помимо этого, он выполняет функцию теплоизоляции. Расплавление флюса занимает до 60 сек. Удаляется флюс единым фрагментом. Очевидно, что

применение флюса также исключает прямой контакт зеркала расплава с атмосферным кислородом, что резко снижает угар легирующих элементов.

Масса отливки (с прибылями для обработки шлифовкой участков прибыли вровень с плоскостью поверхности) составляет 4,7 кг (при массе готового изделия 4,2 кг), масса литниково-питающей системы составляет 28 кг, которая складывается из сумм масс стояка – 12 кг, литникового хода – 3 кг, прибыли – 12,5 кг и питателей – 0,5 кг. Исходя из того, что по технологии изготовления форм количество отливок в форме составляет 6 шт. – выход годного составляет 50% (количество отливок в форме — 6 шт., масса годного 6·4,7=28,2 кг, масса жидкого металла на форму составит 28,2+28=56,2 кг).

Исходя из производительности формовочного участка, составляющего 10 форм в час или 60 отливок в час, выход годного в час составит 60·4,7=282 кг, с учетом массы литниково-питающей системы 10·28=280 кг количество жидкого металла будет равняться 282+280=562 кг/час.

Таблица 11. Технические характеристики индукционных печей ИСТ с гидравлическим подъёмным механизмом

№ пп.	Наименование	Входное напряжение U, В	Мощность источника питания, кВт	Частота F, кГц	Объём печи V, кг стали	Производительность печи, т/ч стали[11]
1	2	3	4	5	6	7
1	ИСТ-0,6/0,4	3х380	400	1,0	600	0,52
2	ИСТ-0,8/0,5	3х380	500	1,0	800	0,70
3	ИСТ-1,0/0,5	3х380	500	1,0	1000	0,70
4	ИСТ-1,0/0,63	3х380	630	1,0/0,5	1000	0,76
5	ИСТ-1,0/0,8	3х380	800	1,0/0,5	1000	1,00
6	ИСТ-1,5/0,8	380 / 540 / 6000	800	1,0/0,5	1500	1,00
7	ИСТ-2,0/1,0	380 / 540 / 6000	1000	1,0/0,5	2000	1,25

С учетом изложенного, производительность за одну 8-и часовую смену составит:

$$562 \cdot 8 \cdot 0{,}8 = 3596{,}8 \text{ кг}, \qquad (11)$$

[11] Скорость плавки рассчитана при непрерывном режиме работы, прогретом тигле и номинальной емкости тигля

где 0,8 — поправочный коэффициент, учитывающий временные затраты на подготовительные технологические операции (подготовку, чистку и др.) и перерывы специалистов.

Стоит отметить, что одновременно можно залить не более 20 форм массой 56,2·20=1124 кг, что связано с потерей температуры металла в ковше.

При работе:

- в 1-у смену производится 3 596,8 кг на заливку 80 форм (10 форм/час),
- в 2-е смены производится 7 193,6 кг на заливку 160 форм,
- в 3-и смены производится 10 790,4 кг на 240 форм.

При работе в 3 смены с двумя выходными днями производительность плавильных агрегатов плавильного комплекса составит:

$$10\,790{,}4 \cdot 0{,}96 \cdot 0{,}8 = 8\,287{,}1 \text{ кг/сутки жидкого металла,} \quad (12)$$

где 0,96 — поправка на безвозвратные потери (описаны ранее), составляющие 4%, 0,8 — коэффициент, учитывающий различные простои плавильного оборудования. Конечная производительность участка определяется количеством 8-и часовых смен в сутках (таблица 12). При таком режиме работы производство считается массовым (годовая производительность отливок при массе отливки менее 20-и кг. составляет более 200 000 кг) [56].

Таблица 12. Производительность участка выплавки колосников в зависимости от количества 8-и часовых смен в сутках

Количество смен в сутках	Суточная производительность участка		Часовая производительность участка	
	кг./сутки	отливок/сутки	кг./час	шт./час
1	2	3	4	5
1 смена	2 762,4	293	115,1	12,2
2 смены	5 524,7	587	230,2	24,0
3 смены	8 287,1	881	345,3	36,7

Температура разливки стали определяется по следующей формуле [56]:

$$T_{зал.} = t_{лик.ж.} - 65 \cdot C - 8 \cdot Si - 5 \cdot Mn - 25 \cdot S - 30 \cdot P - 1{,}5 \cdot Cr - 4 \cdot Ni + t_{корр.}, \quad (13)$$

где $t_{корр.}$ – корректировочная температура (параметр выше линии ликвидус) процесса разливки, зависит от количества заливаемых форм, потерь температуры

металла в ковше, металлоемкости ковша и в общем составляет 50÷100°С (100°С для стали 40Х24Н12СЛ),

$t_{лик.ж.}$ – примем 1539°С (ввиду отсутствия других данных),

0,35; 1,5; 0,5 и т.д. – среднее содержание элемента в % (таблица 13).

Таблица 13. Корректированный химический состав стали 40Х24Н12СЛ

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

Температура разливки стали определяется по следующей формуле:

$T_{зал.} = 1539 – 65·0,3 – 8·0,5 – 5·0,3 – 25·0,03 – 30·0,035 – 1,5·22 – 4·11 + 100$;

$T_{зал.}$ = 1535,2°С, т.е. расчётная температура заливки 1535,2±10°С,

где 0,35; 1,5; 0,5 и т.д. – среднее содержание элемента в % (таблица 13).

Очевидно, что расчётная температура заливки не может быть оптимальна, так как всегда будет ниже $t_{лик.ж.}$, даже при учёте в расчёте минимального содержания легирующих элементов.

На производстве колосников подобрана температура разливки

Описание технологии выплавки.

1. Выплавка стали 40Х24Н12СЛ проводится в индукционных сталеплавильных печах вместимостью 2,0 т. преимущественно с использованием свежих материалов. Следует стремиться к использованию не более 30 % отходов в плавке. Запрещается загрузка влажной шихты в расплавленный металл.

2. Технологический цикл плавки состоит из трех периодов: загрузки и плавления шихты; рафинировки и доводки металла до заданного химического состава; разливки металла.

3. Расчетная и рекомендуемая в готовом металле массовая доля основных элементов оговаривается в задании на плавку.

4. Порядок завалки шихтовых материалов по ходу плавления следующий:

А. загрузка собственного возврата, металлического никеля, феррохрома, электродного боя, стальных отходов;

B. расплавление металла, удаление первичного шлака, нагрев металла до 1600±20°С;

C. ввод кремния;

D. ввод алюминия (опционально).

5. Разрешается часть отходов давать вначале и середине периода плавления.

6. Плавление материалов проводится на номинальной электрической мощности, позволяющей избежать зависания шихты, образования «мостов» или очень бурного кипения расплава. При появлении первых капель металла и до окончания плавки вести постоянный визуальный контроль жидкого металла. При появлении большого количества шлака, не позволяющего вести визуальный контроль нагрева металла, следует:

- Отключить печь;
- Убрать шлак;
- Измерить температуру металла;
- В случае превышения требуемой температуры металл захолодить присадками шихтовых материалов (если идет период плавления) или охлаждением расплава при выключенной печи (если идет период доводки и рафинировки);
- Слить металл и осмотреть футеровку печи.

7. После полного расплавления шихты производится нагрев жидкого металла и измерение температуры его термопарой погружения.

8. При достижении заданной температуры отбирается проба металла для проведения экспресс-анализа.

9. Период рафинировки и доводки металла по пунктам C и D до заданного химического анализа включает технологические операции [107]:

- раскисление, легирование и микролегирование металла в порядке и количествах вводимых добавок согласно заданию на плавку;
- измерение температуры;
- контроль величины тока утечки на «землю» и контроль поведения стрелок измерительных приборов: ваттметра, вольтметра и амперметра -

хаотичное колебание стрелок измерительных приборов при значительном возрастании тока утечки на землю свидетельствует о неудовлетворительном состоянии футеровки тигля. При возникновении подобной ситуации металл следует слить как паспортную плавку и провести осмотр тигля.

- снятие шлака в печи:

  - печь отключить,

  - присыпать зеркало металла коагулянтом шлака,

  - отбить шлак и гарниссаж с воротника печи, не допуская разрушения футеровки,

  - снять коагулянт вместе со шлаком в шлаковню,

  - операцию повторить 2-3 раза, обеспечив при этом 100%-ную уборку шлака с зеркала металла.

10. Общая продолжительность периода рафинировки и доводки регламентируется номинальным временем. Номинальное время находится путем суммирования продолжительности отдельных операций (введение добавок, отбор пробы, измерение температуры), средняя продолжительность которых должна быть не более 15 мин.

11. Перед отбором проб производится перемешивание металла в течение 30-60 секунд на повышенной мощности печи.

12. Измерение температуры жидкого металла производится как перед выпуском металла из печи, так и непосредственно перед заливкой металла в первую форму. Отбор маркировочной пробы производится только из ковша согласно ГОСТ 7565.

Описанную технологию выплавки стали 40Х24Н12СЛ можно считать оптимальной, за исключением температуры разливки стали, метод определения которой выбран не оптимально. Учитывая, что температура разливки один из важнейших параметров технологии, определяющий качество колосников (наличие литейных дефектов, количество не металлических включений и др.) – её необходимо определять другими методами.

1.7 Технология литья колосников из стали 40Х24Н12СЛ

В соответствии с чертежом детали (приложение 1) и годовой программой производительности (6-ть отливок в форме) разливку предполагается выполнять методом литья в одноразовую песчано-глинистую форму (холодно-твердеющую смесь (ХТС)) с отверждением вне контакта с оснасткой (исходя из экономической целесообразности и соблюдения требований, предъявляемых к детали, описанных ранее). Формовка – машинная, по металлическим моделям с калибровкой их по шаблонам.

Исходя из ранее изложенного – класс точности размеров отливки – 13-ый (ГОСТ 53464-2009). С учетом данных таблицы 14 [56], допуск на ширину 40 мм – 0,12 мм, на длину 314 мм – не определен, а по чертежу (приложение 1) 1 и 2 мм соответственно.

Таблица 14. Допуски размеров отливок [56]

Классы точности размеров отливок	Допуски номинальных размеров, мм											
	x<4	4<x>6	6<x>10	10<x>16	16<x>25	25<x>40	40<x>63	63<x>100	100<x>160	160<x>250	250<x>400	x>400
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	—	—	—
2	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	—	—	—
3Т	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	—
3	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,56
4	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,50	0,70
5Т	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,50	0,56	0,64	0,90
5	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,50	0,56	0,64	0,70	0,80	1,10
6	0,32	0,36	0,40	0,44	0,50	0,56	0,64	0,70	0,80	0,90	1,00	1,40
7Т	0,40	0,44	0,50	0,56	0,64	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,80
7	0,50	0,56	0,64	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,40	1,60	2,20
8	0,64	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,80
9Т	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	3,6
9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,8	3,2	4,4
10	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	5,6
11Т	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	5,0	7,0
11	2,0	2,2	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	5,0	5,6	6,4	9,0
12	—	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	5,0	5,6	6,4	7,0	8,0	11,0
13Т	—	—	4,0	4,4	5,0	5,6	6,4	7,0	8,0	9,0	10,0	14,0
13	—	—	5,0	5,6	6,4	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	18,0
14	—	—	—	7,0	8,0	9,0	10,0	11	12,0	14,0	16,0	22,0
15	—	—	—	—	10,0	11,0	12,0	14	16,0	18,0	20,0	28,0
16	—	—	—	—	12,0	14,0	16,0	18	20,0	22,0	24,0	—

Степень коробления отливки определяется исходя из соотношения большего и меньшего линейных габаритных размеров по таблице 15: 40:314 = 0,12, степень коробления 1-2.

Таблица 15. Предельные для коробления отклонения [56]

Габариты отливок, мм	Пределы отклонении для k - степеней коробления отливок, мм,									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
k<100	—	—	—	—	—	0,1	0,16	0,24	0,40	0,60
100<k<160	—	—	—	—	0,1	0,16	0,24	0,40	0,60	1,0
160<k<240	—	—	—	0,1	0,16	0,24	0,40	0,60	1,0	1,6
240<k<400	—	—	0,1	0,16	0,24	0,40	0,60	1,0	1,6	2,4
400<k<630	—	0,1	0,16	0,24	0,40	0,60	1,0	1,6	2,4	4,0
k>630	0,1	0,16	0,24	0,40	0,60	1,0	1,6	2,4	4,0	6,0

Параметры изготовления форм.

Для формовки применяется холодно-твердеющая смесь (ХТС), отвердителем в составе является фенолоформальдегидная смола.

Отвердителем выступает ортофосфорная кислота (70÷80%).

Состав смеси: на 0,5-1,2% кислоты ортофосфорной (70-80%-ной концентрации), 2-5% смолы КФ-90, песок кварцевый остальное. Требования по влажности для смеси: 0,9-1,5%. При таких параметрах живучесть смеси составит 1-1,5 мин, а предел прочности при растяжении ≥ 196 кПа или 2 кгс/см^2. При этом, параметр живучести можно изменять применением разных или разного количества отвердителей (катализаторов). Учитывая параметр живучести - смеситель для приготовления смеси выгоднее выполнять на месте подготовки форм.

У ХТС есть недостатки, например, низкая термостойкость, поэтому применяют противопригарные краски.

<u>Основные материалы для приготовления холодно-твердеющей смеси (ХТС) и требования к ним</u>:

- песок кварцевый (К) марок 1(2,3)К$_1$(2,3,4)О$_1$(2,3,4)О$_2$(016,03) по ГОСТ 2138-91. Температура песка перед применением не более 25°С. Песок необходимо

просеять через сито с размерами ячейки не более 5х5мм. Влажность песка не более 0,5%;

- смола фенол-формальдегидная;
- отвердитель сложноэфирный.

Смесь приготавливается с использованием смесителя, который состоит из двух бункеров для песка и(или) регенерата, песочных ворот, камеры смешивания песка со связующими, насосов подачи связующих, панели управления работой смесителя, шкафа управления.

Тарирование дозирующих устройств смесителя. Смеситель настраивается на два режима работы:

- «смесь» - позволяющий работать на смеси из чистого песка и регенерата, производительность 20 т/час,
- «чистый песок» - позволяющий работать на чистом песке, производительность 12 т/час.

Возможна настройка смесителя на иную производительность инженером-технологом.

Регулярно, не реже 1-го раза в месяц, производится контрольная проверка работы смесителя под руководством мастера формовочно-заливочного участка и в присутствии инженера-технолога. При этом проверяются следующие показатели: расход песка в режимах «смесь» и «чистый песок», расход смолы, расход отвердителей методом взвешивания.

Подготовка смесителя к работе выполняется следующим образом:

1. Засыпать в бункера песок и(или) регенерат. Песок допускается загружать в оба бункера, регенерат только в левый.
2. Заполнить емкости для смолы и отвердителей связующими соответственно.
3. Включить подачу сжатого воздуха и автомат.
4. Выбрать режим работы смесителя.

В зависимости от требуемого времени затвердевания формы или стержня можно выбрать работу на «медленном» или «быстром» отвердителе. Регулировка

производится поворотной ручкой «отвердитель – установка скорости медленный/быстрый».

В зависимости от габаритов формы можно выбрать производительность 12 или 20 тонн/час. Параметр регулируется поворотной рукой «выбор песка – новый/смесь». В ходе заполнения смесью стержневого ящика или формы режимы работы допускается менять, не останавливая работы смесителя.

После выбора режима работы и подготовки модельного комплекта включить смеситель кнопкой «смеситель - пуск», при необходимости остановки смесителя - кнопкой «смеситель-пауза».

Подготовка модельных комплектов к работе и набивка форм и стержней.

Модельный комплект перед началом работы выставляется и проверяется мастером смены и контролером на пригодность к работе. При этом контролируются следующие параметры:

- комплектность, особенно наличие всех отъемный частей,
- отсутствие повреждений (сколы, трещины),
- отсутствие повреждений грузоподъемных частей (цапф, подъемов).

Перед запуском в работу новых модельных комплектов мастер формовочно-заливочного участка совместно с инженером-технологом обязан изучить всю технологическую документацию, относящуюся к данной отливке и проинструктировать сменного мастера и стерженщиков.

Стерженщик, получив модельный комплект и технологию на изготовление отливки, должен разобраться в его конструкции, технологии и получить указания от мастера формовочно-заливочного участка по особенностям изготовления.

Очистить модельный комплект от остатков смеси, собрать согласно чертежа и технологической карте, установив все элементы комплекта и отъемные части, покрыть формообразующие поверхности разделительным покрытием. Установить каркасы (если указано в технологической карте) и подъемы.

Приступить к набивке формы (стержня), тщательно уплотняя вручную поднутрения модели. Поверхность набивки формы (стержня) уплотнить и выровнять при помощи металлической или деревянной линейки. Через 5-10 минут

извлечь отъемные части модели, вынимающиеся вверх, освободить от смеси подъемы для перевозки стержней (при необходимости) и оставить форму (стержень) до полного затвердевания.

Порядок разборки стержневых ящиков и сборка форм. Требования к формам.

После полного затвердевания смеси форму разобрать, модель, литниковую систему, отъёмные части извлечь. Если при разборке формы произошли местные подрывы или небольшие поломки, форму отремонтировать, восстановив поврежденные части.

Покрасить противопригарной краской формообразующие поверхности формы и стержней, нанесенное покрытие поджечь при помощи газовой горелки для полного высыхания краски. Слой нанесенного противопригарного покрытия должен составлять 0,8÷1,0 мм (если в технологической карте не указано иное). Не допускается наличие не прокрашенных участков и пузырей, образующихся в результате нанесения толстого слоя краски. В случае образования данных дефектов, образовавшиеся пузыри и утолщения удалить наждачной бумагой и покрасить вторично.

Установить в форму стержни, поставить идентификационный номер. Форму предъявить для контроля контролеру и после принятия накрыть. Перед накрытием контролировать следующие параметры:

- качество стержней и форм (отсутствие трещин, изломов),
- отсутствие коробления,
- отсутствие осыпаемости,
- отсутствие неуплотненных (рыхлых) участков,
- качественно нанесенного противопригарного покрытия,
- наличие идентификационного номера,
- соответствие формы утвержденной технологии.

После накрытия проконтролировать форму на отсутствие зазора между полуформами.

Исправление дефектов формы.

Небольшие подрывы и недоуплотнения (рыхлый слой) разделать при помощи гладилки до плотного слоя смеси и нарастить свежей смесью ХТС до необходимой конфигурации, дать смеси застыть и зачистить гладилкой или наждачной бумагой.

Отломанные при извлечении модели части формы допускается приклеить клеем «Pulit», предварительно зафиксировав при необходимости при помощи формовочной шпильки. Допускается приклеивать только болваны, находящиеся в нижней форме и придавливаемые при накрытии верхней полуформой, так как клей не обладает достаточной термостойкостью и при заливке болван может всплыть.

Не допускается ремонтировать трещины формы. Формы и стержни с трещинами подлежат выбраковке. В спорной ситуации вызвать инженера-технолога для принятия решения о пригодности стержня (формы) к использованию.

Допускается не исправлять сколы и другие дефекты, не снижающие прочность, на знаковых частях формы (стержня).

Общие требования к формам и стержням, изготовленным из ХТС.

Время отверждения форм (стержней) зависит от применяемого отвердителя, температуры воздуха в помещении, температуры песка и составляет от 1 до 60 минут. Чем ниже температура воздуха и песка, тем медленнее происходит застывание стержня. Рекомендуемый диапазон температур 18-25°С.

Стержни, длина которых превышает высоту более чем в 4 раза, следует после извлечения из ящика хранить на ровной поверхности, неплоскостность которой не превышает 3 мм во избежание коробления стержня. Транспортировать такие формы к месту заливки следует на поддонах, неплоскостность которых также не превышает 3 мм.

Формы по разъему не склеивать, кроме случаев, оговоренных особо в технологической карте на отливку. Клей «Pulit» предназначен для ремонта форм и стержней. В отдельных случаях допускается склеивание полуформ, если есть опасность ухода металла в разъем (из-за местного скола, коробления, неплотного прилегания полуформ и т.п.) и только перед заливкой формы.

Время выдержки формы до заливки не менее 3 часов. Время хранения изготовленных форм (стержней) до заливки неограниченно. При длительном хранении форм (стержней) следует выполнять следующие требования:

- стержни должны храниться на ровной поверхности во избежание коробления,

- формы (стержни) должны храниться в защищенном от попадания влаги, масел месте, так как смесь гигроскопична и может произойти отсыревание форм.

При подготовке под заливку форм, время хранения которых превышает 3 суток, следует произвести контрольное вскрытие и предъявление контролеру форм для проверки всех параметров.

Формы под заливку выставляются на поддонах или устанавливаются на ровные участки плаца (при необходимости произвести подсыпку неровностей горелой смесью и выровнять, т.е. установить на «постель»).

При подготовке к заливке необходимо обеспечить расстояние между формами ≥ 500 мм.

В случае перевозки изготовленной формы под заливку из другого цеха форму обязательно вскрыть и предъявить контролеру и сменному мастеру для проверки на соответствие следующим параметром:

- отсутствие обвалов,

- отсутствие разрушенных частей и отсыревших участков, отслоения краски,

- наличие маркировки.

В случае выявления несоответствий формы производится её ремонт.

<u>Технология разливки стали.</u>

1. Размещение опок под заливку должно быть компактным, исключающим переезды ковша с металлом более, чем на 10 метров. При этом расстояние между рядами форм должно быть не менее 0,8 метра.

2. Литниковые воронки у форм одинаковой высоты должны быть на одном уровне и на одной прямой, чтобы переход ковша от одной формы к другой осуществлялся одним движением крана (мостом или тележкой).

3. В процессе разливки расстояние между носком ковша и воронкой не должно превышать 300 мм.

4. Не разрешается перерыв струи металла при разливке или разливка рассеянной струей.

5. Во время разливки необходимо поджигать газ, выходящий по разъему формы.

6. При образовании незначительного прорыва формы заливку не прекращать, а сократив подачу металла, ликвидировать прорыв и продолжать заливку с прежней интенсивностью. В случае, когда прорыв значительный или создается невозможность работы разливщика, заливку форм следует прекратить, разлитый металл засыпать землей.

7. После заполнения формы производится утепление прибылей, стояка и выпоров экзотермической смесью, люнкеритом, коксиком или формовочным песком (согласно указаниям технологической карты). Заливы на опоках подорвать, заливочные чаши сломать, чтобы не препятствовать свободной усадке металла и избежать коробления и трещин на отливках.

8. Отбор пробы для механических испытаний и маркировочных проб химического анализа производится перед началом разливки по формам после снятия шлака. В случае разливки из нескольких ковшей пробы на определение химического анализа отбираются от каждого ковша. Порядок отбора, маркировка и подготовка проб к испытаниям регламентируется стандартами предприятия.

Анализируя изложенную технологию разливки стали 40Х24Н12СЛ (включая технологию подготовки форм) можно сделать вывод о её приемлемости и оптимальности на сегодняшний день. Таким образом, изменять технология разливки не требуется, а следует лишь отслеживать соблюдение описанных норм и требований.

1.8 Выводы

Колосники обжиговых тележек эксплуатируются в агрессивных условиях, которые продолжают изменяться на более сложные. К наиболее интенсивно влияющим на стойкость колосников условиям эксплуатации можно отнести:

1. Технологические параметры эксплуатации обжиговой машины:

- скорость изменения температуры по длине машины (так, скорость охлаждения колосника может достигать 222°С в минуту, в зависимости от схемы газо-воздушных потоков обжиговой машины);
- повышение рабочей температуры, температуры обжига, что является основным параметром увеличения оптимизации процесса обжига по многим критериям (тепловая, электрическая экономичность и удельная производительность), температура обжига окатышей сегодня достигает 1360°С;
- наличие компонентов систем и подсистем АСУТП (исключающих серьезные отклонения в работе основных устройств и параметров – в том числе серьёзные перегревы колосникового поля);
- кратковременные остановки машины на мелкие ремонты и замену обжиговых телег, что приводит к увеличению температуры (краткосрочному локальному перегреву колосников до 1250°С) и увеличению содержания в составе газа агрессивных примесей CO, SO_2, SO_3, NO_x.

2. Качество обрабатываемого сырья и используемого теплоносителя:

- за последние годы увеличилось количество серы в обрабатываемом сырье – она в виде газообразных продуктов реакции (SO_2, SO_3) выделяется в рабочее пространство обжиговой машины, в результате чего, совместно с остаточным кислородом после горения, в колоснике могут протекать процессы серной коррозии;
- наличие в газодутьевом потоке абразивной пыли, что приводит к дополнительному угару (ввиду истирания окалины и оксидной плёнки).

В сложившихся рыночных условиях очевидно, что рентабельность от повышения производительности обжиговых машин не сопоставимо выше дополнительных затрат на её обслуживание (в том числе затрат на колосники).

Анализ литературных источников (в том числе зарубежных) и аналогичных производств показал, что сталь 40Х24Н12СЛ за это время не получила успешных и обоснованных технически или экономически модификаций, и по факту, продолжает изготавливаться по условиям ГОСТ 977-88, которые не менялись с 1990 года. При этом отечественных аналогов для замены стали 40Х24Н12СЛ не изыскано. Все это привело к неудовлетворительным результатам оценки эксплуатационного ресурса литых колосников отечественными заказчиками – в 2010-2020 гг. произошёл массовый отказ от колосников из стали 40Х24Н12СЛ большой частью заказчиков.

Стоит отметить, что возможность замены колосников из стали 40Х24Н12СЛ на зарубежный аналог «EN, 1.4837, GX40CrNiSi25-12», имеющий массовое применение в мире, позволяет достигнуть более длительных сроков эксплуатации (как минимум 3 года, при температурах в зоне обжига до 1360°С), но влечет за собой увеличение издержек на получаемую продукцию. При этом, зарубежный аналог имеют практически идентичный химический состав, а цена стали GX40CrNiSi25-12, определяется не только издержками на транспортировку, оплату патентов и дорогостоящей рабочей силы, но и курсами валют, что в итоге определяет среднюю цену в 11,9 долл./кг, при этом, цена отечественных колосников из стали 40Х24Н12СЛ – 5,4÷6,8 долл./кг (по данным на 2018-2020 гг.). Исходя из чего, существует высокая привлекательность в достижении аналогичных импортным эксплуатационных характеристик у колосников отечественного производства из стали 40Х24Н12СЛ без резкого повышения себестоимости.

Учитывая, что эксплуатационный ресурс колосников определяется не только условиями эксплуатации, но и качеством технологии изготовления (выплавки, разливки и термообработки) – дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении повышения эксплуатационного ресурса колосников из стали 40Х24Н12СЛ. Необходимо установить истинные причины и механизмы

преждевременного разрушения колосников из стали 40Х24Н12СЛ и модернизировать технологию их изготовления от литья и разливки до термообработки для достижения отечественными колосниками эксплуатационного ресурса сопоставимого с зарубежными аналогами (срок службы не менее 3-х лет).

2. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛОСНИКОВ ПРЕЖДЕВРЕМЕННО ВЫШЕДШИХ ИЗ СТРОЯ

2.1 Испытания колосников, изготовленных по ГОСТ 977-88 от различных производителей

Производители (ОК-306 на АО «Лебединский ГОК» и ОАО «Северный ГОК», Лурги-480 на ОАО «ОЭМК», ОК-520 на ОАО «Михайловский ГОК»), использующие колосники, производимые из стали 40Х24Н12СЛ по ГОСТ 977-88 [2], накопили существенный производственный опыт. Из которого следует вывод о недостаточности требований предъявляемых к колосниковым отливкам ГОСТом 977-88. Так, при проведении испытаний колосников изготовленных из марки стали 40Х24Н12СЛ, удовлетворяющих ГОСТ 977-88, но от разных производителей, полученные данные о качестве деталей сильно разнятся (сроки эксплуатации, жаростойкость, количество отбракованных деталей). Стоит отметить что не только качество разнится, но и стоимость изделий от разных поставщиков (без учета дополнительных издержек на транспортировку и др.).

Были проведены испытания колосников из стали 40Х24Н12СЛ удовлетворяющих ГОСТ 977-88 от двух разных производителей, именуемых в дальнейшем: Производитель 1 и Производитель 2, на обжиговой машине ОК-306 ОА «Лебединский ГОК» (характеристики обжиговой машины приведены в таблице 16). **Методика испытаний была утверждена цехом: испытания длились 36 месяцев, отслеживались все выходы из строя колосников с целью достоверно установить эксплуатационный ресурс каждой партии. Отслеживались: количество установленных и демонтированных колосников с экспериментальных телег, а демонтированные в брак колосники дефектовались для установления причин выхода из строя.** На протяжении всех испытаний любые манипуляции с колосниками обоих производителей документировались актами и журналами учета замен сменным персоналом. Все переборки колосникового поля производились под надзором сменных инженеров.

При этом, ответственный инженер за проведение испытаний проводил выборочные проверки результатов, указанных в документах учета движения колосников. Таким образом, проведенные испытания обладали высокой степенью достоверности, весь дальнейший анализ выполнен на результатах этих испытаний.

С учетом того, что испытания проводились на непрерывно работающей обжиговой машине (с последовательной заменой колосников обжиговых тележек при кратковременных остановках обжиговой машины на 5 – 10 минут), количество установленных на обжиговую машину колосников и сроки их эксплуатации разнятся, что требует приведения показателей к усреднённым значениям для возможности их сравнивать. За начало срока эксплуатации колосников считался день, в который первая партия колосников была установлена на обжиговую машину.

Длительность испытаний составила в среднем 24÷28 месяцев (сроки эксплуатации партий колебались в пределах от 22-х до 30-и месяцев).

Таблица 16. Параметры ОМ ОК-306 участвующих в испытаниях

1.	Годовое производство цеха (2-е ОМ), т	9 127 070,00
2.	Месячное производство цеха (2-е ОМ), т	760 589,17
3.	Установлено тележек обжиговых на 2-е ОМ, шт	756
4.	Месячный объем производства на одну обжиговую тележку, т	1006,07
5.	Количество колосников на обжиговой тележке, шт	292
6.	Месячный объем производства на один колосник, тонн	3,45

Установка колосников велась постепенно, но пропорционально, так при установке 1 телеги в день с колосниками от производителя 1, ставили 2 телеги с колосниками от производителя 2. Разница в количестве колосников, установленных на обжиговую машину от разных производителей (2323 шт. от производителя 1 и 4529 шт. от производителя 2) объясняется соотношением

количества колосников от этих производителей в наличии (количеством купленных штук в пропорции 1-ин к 2-ум от производителей 1 и 2 соответственно).

Результаты эксперимента обоих поставщиков см. в таблице 17. Колосники от производителя 1 дороже, чем от производителя 2, при этом имеют разную среднюю массу. Разница в массе колосников обусловлена разностью их геометрических размеров и, возможным, наличием усадочных раковин, что является дефектом технологии литья. Так, колосники от производителя 2 шире, но их замковая часть меньше, а приливы для прососа газа имеют большую протяженность, чем от производителя 1 (2 прилива по 92 мм с каждой стороны от производителя 2, по сравнению с 86 мм от производителя 1). Изменения конструкции замковой части колосника могут привести к увеличению производительности обжиговой машины или качества получаемого окатыша (за счёт улучшения условий «прососа» газа через слой) [57]. Не посредственно об этом заявляют производители колосников новой формы (приложении 9) – применение колосников новой формовки, по сравнению со старой (приложение 1), увеличивает производительность обжиговых машин разной конфигурации в среднем на 3%.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод о том, что технология формовки колосника и его геометрические размеры (в первую очередь, размеры приливов для прососа газа), не оговорённые в ГОСТ 977-88 оказывать влияние на параметры эксплуатации обжиговых машин, на себестоимость получаемой продукции и её объёмы.

Данные по количеству произведённой продукции были получены произведением между: объёмом производства на 1 колосник в месяц (таблица 16, строка 6), общим количеством установленных и сроками эксплуатации колосников данного типа (таблица 17, столбец 3).

Качество экспериментальных колосников отслеживалось тремя основными параметрами (таблица 18):

- количеством колосников, сданных в металлолом – общим количеством отбракованных колосников при переборке телеги рабочим персоналом (причины

отбраковки: трещины, коробление, изломы в т.ч. замковых частей, дефекты поверхности (МКК)),

- производственными потерями – общим количеством утерянных колосников с телеги в процессе её эксплуатации (при работе машины часть колосников при изломах и выгорании падают в вакуум-камеры),

- угаром колосниковой решетки – при длительной эксплуатации количество колосников, установленных на обжиговую телегу увеличивается, что связано с утонением колосниковой решетки (её угаром), по величине угара сравнение производилось исходя из дополнительного количества колосников, которые были установлены на тележки для полного заполнения поля.

Таблица 17. Статистика по производителям

№	Срок эксплуатации, мес.	Кол-во установленных, шт.	Цена*, руб./кг.	Масса детали, кг.	Количество произведённой продукции на общее количество колосников, тонн
1	2	3	4	5	6
Производитель 1	24	2323	155,08	4,00	192 090,52
Производитель 2	28	4529	141,03	4,42	436 923,94

*цена указана без учета издержек на логистику

Таблица 18. Выходы из строя

№	Металлолом, шт.	Доля металлолома, %	Производственные потери, шт	Доля производственных потерь, %	Угар, шт	Доля угаревших, %
1	2	3	4	5	6	7
Производитель 1	256	11,02	31	1,33	40	1,72
Производитель 2	155	3,42	27	0,60	27	0,60

Исследования колосников от разных поставщиков показали, что основная причина выходов из строя колосников от обоих производителей – отбраковка их как лом сменным персоналом при ремонтах колосникового поля (11,02 и 3,42%), на долю угара приходится не значительная часть потерь (1,33 и 0,6% // 1,72 и 0,6%).

Таблица 19. Сводный анализ

№	Брак, шт.	Доля вышедших из строя, %
1	2	3
Производитель 1	327	14,08
Производитель 2	209	4,61

Для того, чтобы сравнить данные о качестве колосников от разных производителей, разницей в сроках эксплуатации можно пренебречь, т.к. сроки эксплуатации колосников от обоих производителей практически одинаковые: 24 мес. для колосников от производителя 1 и 28 мес. для колосников от производителя 2, разница составляет 4 мес. (менее 15 %). Данные таблицы 20 свидетельствуют о превосходящем качестве поставщика 2, в сравнении с поставщиком 1, при этом цена у колосников лучшего качества ниже (таблица 17).

Параметры сдачи в металлолом при ремонтах телег, потерь и угара (таблица 18) – отношение вышедших из строя колосников к времени их нахождения в эксплуатации. Далее, параметры потерь и угара (таблица 20) суммированы и сопоставлены с потерями при переборках (выбраковка в металлолом), см. рис. 8.

Из данных рис. 8 следует, что доля сдаваемых в металлолом колосников много больше, чем суммарная доля выхода из строя по остальным статьям (угара и потерь) ежемесячно, у обоих производителей. Несмотря на большую разницу в качестве колосников от разных производителей, пропорциональность вышедших из строя колосников практически одинакова, доля сданных в металлолом колосников превосходит в ~ 3 раза суммарную долю по остальным статьям выхода колосников из строя у обоих производителей.

Исходя из вышеизложенного следует, что основным направлением повышения качества колосников обжиговых тележек является изменение в технологии их изготовления (выплавки, литья и термообработки), которые позволят исключить ранний выход детали из строя по причинам: сдачи в

металлолом (трещины, коробление, изломы замковых частей, дефекты поверхности и коррозия).

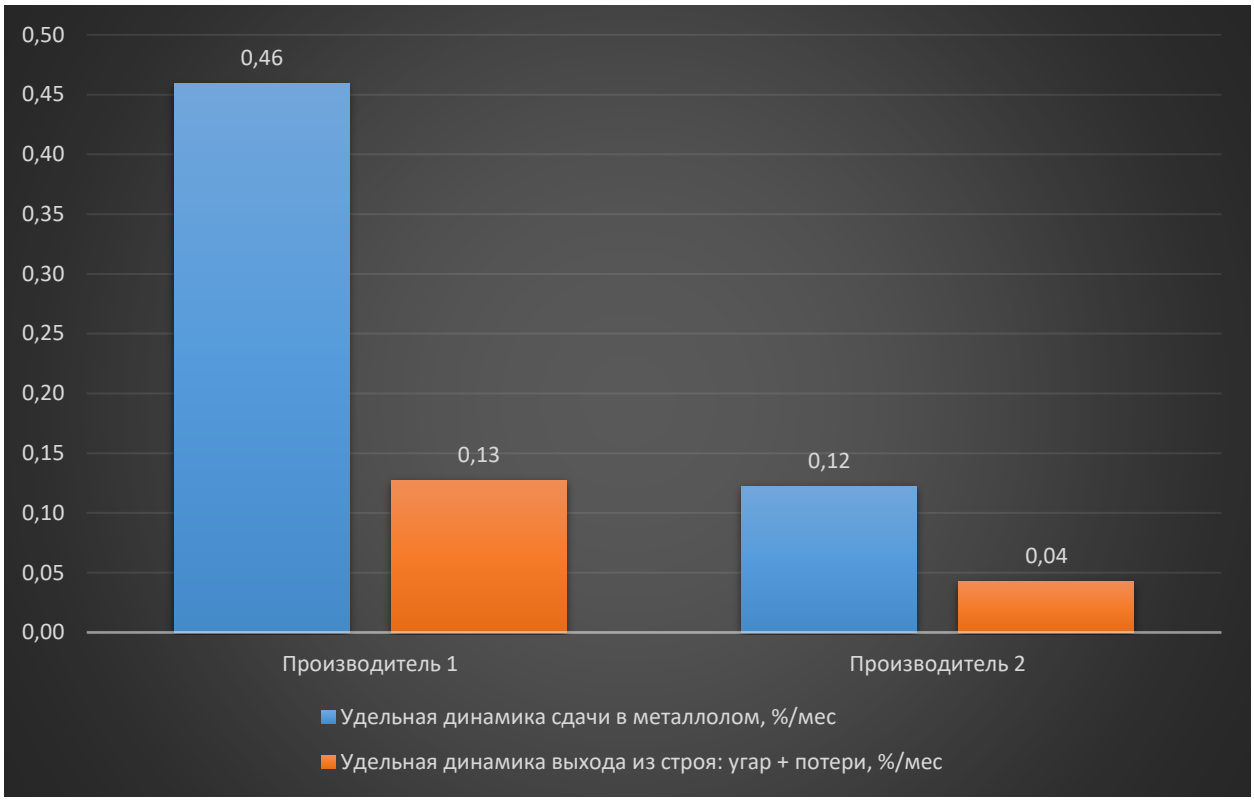


Рисунок 8. Графическое изображение разницы между удельной динамикой сдачи в металлолом и суммой удельных динамик потерь и угара (данные таблицы 20).

Таблица 20. Свод по статьям выхода из строя

№	Удельная динамика переборки в металлолом, %/мес.	Удельная динамика потерь, %/мес.	Удельная динамика угара, %/мес.	Суммарная удельная динамика угара и потерь, %/мес.
1	2	3	4	5
Производитель 1	0,46	0,06	0,07	0,13
Производитель 2	0,12	0,02	0,02	0,04

Следует отметить, что в ГОСТ 977-88 изложено недостаточное количество требований к колосникам из стали марки 40Х24Н12СЛ. Так, оба производителя (рис. 8) удовлетворили требования ГОСТа 977-88, но разница в качестве между ними составила 283% и 225% (разница в удельной динамике сдачи в металлолом и

угара вместе с потерями соответственно) или **268,75%** между суммарными удельными динамиками выхода из строя.

2.2 Исследование причин преждевременного выхода из строя колосников во время эксплуатации

Исходя из того, что все утерянные с обжиговых телег при эксплуатации колосники (столбец 4 таблицы 18) находятся во время ремонтов в вакуум-камерах и на решётках «течек» конвейеров постельного тракта, по найденным колосникам можно установить причину их утерь (хоть и невозможно точно определить обжиговую телегу, с которой они упали, и время, когда это произошло).

После проведения исследования всех колосников, найденных в вакуум-камерах за один межремонтный период обжиговой машины ОК-306 (12 месяцев) было установлено, что 37% всех найденных колосников имели изломы, недостающие части, или вовсе были найдены обломками, остальные 67% колосников серьёзных повреждений и нарушений целостности не имели (в результате частично возвращались в эксплуатацию), что говорит об их выпадении из обжиговой тележки после образования пустоты в ряде колосников, предположительно образовавшейся, при разрушении 37% разрушенных колосников.

После анализа работы обжиговой машины, была установлена единственная причина потери колосников при их эксплуатации – это их разрушение (рис. 9). Основной вред от изломов – это влияние на оставшиеся в ряду колосники: они могут вываливаться при образовании в ряде «ёлочки» (наклона), и ускоренно выгорать, так как теплоноситель устремляется в образовавшиеся пустоты (рис. 10). Также, образование свободного места в ряду приводит к нарушению укладки слоя на обжиговую машину (к неровностям слоя или к «дырам» в слое), в результате чего, резко повышается температура эксплуатации колосников, и они начинают ускоренно выгорать и оплавляться. Выпадение одного разрушенного колосника и несвоевременное обнаружение обслуживающим персоналом этого явления приводит к потере большого количества колосников, в том числе пригодных к дальнейшей эксплуатации.

Рисунок 9. Фото обжиговой телеги проходящей головной радиус обжиговой машины ОК-306 (находящейся в эксплуатации).

Выделение чёрным – участок колосниковой решётки с колосником, разрушенным в замковой части, на месте разрушения - трещина в балке

После анализа причин потерь колосников во время эксплуатации стало возможным сделать вывод: основными причинами потерь колосников при эксплуатации являются нарушения целостности детали (трещины, коробления, изломы, в основном замковых частей). Исходя из того, что в том числе по этим же причинам происходит выбраковка колосников по статье «металлолом» во время переборки обжиговых тележек обслуживающим персоналом, пользуясь данными статей выхода из строя колосников (таблица 19) и построенных на этой основе данных графика – рис. 8, становится возможным изобразить распределение по причинам выхода колосников из строя более рационально, и по разным производителям – таблица 21.

Рисунок 10.Фото обжиговой телеги проходящей головной радиус обжиговой машины ОК-306 (находящейся в эксплуатации).

Нижний (или ближний к объективу) ряд колосников стоит с искривлением, свободно, на обжиговой телеге появился дефект колосниковой решётки типа «ёлочка»

Данные по удельной динамике выхода из строя колосников по причинам: трещины, коробление, изломы замковых частей, дефекты поверхности (таблица 21), были получены суммой удельных динамик сдачи в металлолом и потерь (таблица 20). Данные по удельной динамике выхода из строя колосников по причине угар также взяты из таблицы 20.

На основании изложенных данных, становится возможным графически изобразить соотношение по статьям выхода из строя колосников от разных производителей на основании графика (рис. 8) и таблицы 21 (перестройка графической зависимости рис. 8 на основании новых данных из таблицы 21). Такое перераспределение по причинам выхода из строя колосников представлено на рис.

11 и более корректно отражает сегментированную динамику выхода из строя колосников в сравнении с рис. 8.

Таблица 21. Основные сравниваемые параметры для оценки качества колосников

№	Удельная динамика выхода из строя колосников по причинам: трещины, коробление, изломы замковых частей, дефекты поверхности, %/мес.	Удельная динамика выхода из строя колосников по причине: угар, %/мес.
1	2	3
Производитель 1	0,51	0,07
Производитель 2	0,14	0,02

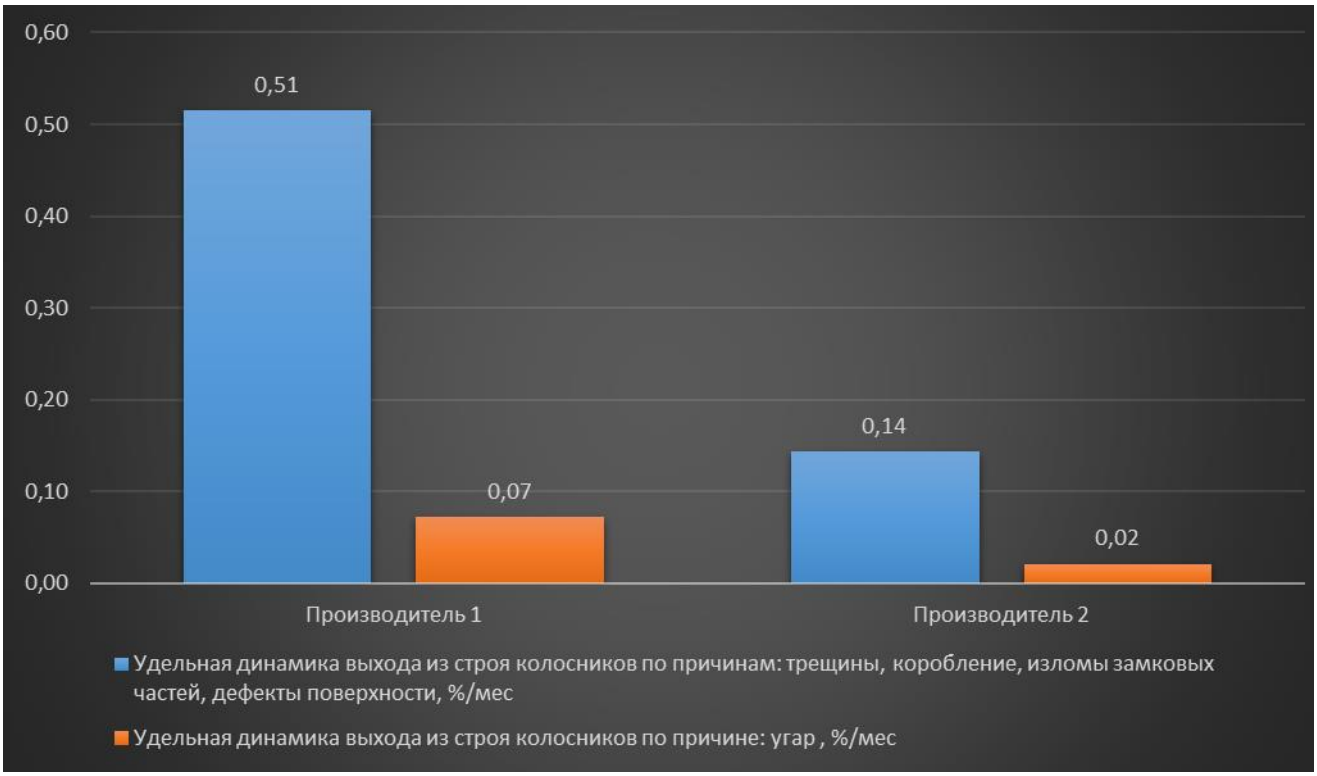


Рисунок 11.Соотношение по статьям выхода из строя колосников от разных производителей

Так как колосники обжиговых тележек эксплуатируются в условиях высоких градиентов температур: температура цикла варьируется от 20 до 1350°С до 1,5-2 часа, соответственно сами колосники на верхней поверхности подвергаются прогревам до 850÷1250°С [8, 14], угар поверхности стали неизбежен, при этом, доля вышедших из строя колосников по причине угара поверхности много меньше

(в среднем в 7 раз) и составляет всего 13,7÷14,3% (в зависимости от производителя), чем доля колосников, выбракованных персоналом после переборки обжиговых телег и изъятия утерянных колосников из вакуум-камер, что зафиксировано в документах движения колосников, в этом случае были усыновлены следующие виды дефектов: трещины, разрушения (в основном замковых частей), коробление, коррозионное разрушение (МКК).

Стоит отметить, что угар колосников неизбежен и протекает на жизненном цикле колосника, при этом, работать в сторону увеличения жаростойкости не исключив возможность дефектообразования не целесообразно, так как все дефекты проявляются в первый год эксплуатации детали, когда статья расхода колосников по угару минимальна, а увеличение жаростойкости не принесёт полного эффекта ввиду раннего выхода детали из эксплуатации. Исследования в сторону увеличения жаростойкости возможно проводить только после исключения всех видов дефектов, по которым производится выбраковка при переборках поля и потери при эксплуатации в вакуум камеры.

Учитывая все вышеописанное, следует вывод, что необходимо выполнять исследования в направлении исключения дефектов колосников, по причинам которых происходит их выход из строя в первый год эксплуатации. Необходимо выполнить улучшение технологии выплавки, литья и термообработки колосников, которое приведёт к снижению доли выхода из строя колосников по внешним признакам (трещины, коробление, изломы замковых частей, коррозионное разрушение (МКК)).

2.3 Статистический анализ причин выхода из строя литых колосников обжиговых тележек

Для установления количественного соотношения дефектов, которые являются причиной преждевременного выхода из строя колосников по внешним признакам, был проведен анализ всех выходивших из строя и найденных после потерь колосников на протяжении одного межремонтного периода (12 месяцев) обжиговой машины ОК-306 без замены колосникового поля (на обжиговой машине не производилась замена колосникового поля перед началом эксперимента, это означает, что установленные колосники имели разные сроки эксплуатации).

Результаты анализа отбракованных колосников были разделены на группы с тем учетом, что часть колосников были подвержены сразу нескольким видам дефекта:

1 группа: 95,5% колосников подверженных коррозионному разрушению в разной степени (рис.12а), при этом 17,5% колосников этой группы, помимо коррозионного разрушения, были подвержены короблению (рис. 12б), и 12,5% колосников – имели крупные трещины или изломы (рис. 12в);

2 группа: 13,2% колосников имели трещины (рис. 13), изломы, в основном, замковых частей, (рис. 12в, 14) или дефекты поверхности, при этом, только 0,7% не были подвержены коррозионному разрушению;

3 группа: 21,3% колосников были подвержены короблению (рис. 12б), при этом, только 3,8% не были подвержены коррозионному разрушению.

Поверхностное разрушение колосников, предположительно появившееся в результате межкристаллитной коррозии (МКК), наблюдалось в подавляющем большинстве вышедших из строя колосников (95,5%), но не всегда была основной причиной выхода их из строя, ввиду наличия более серьёзных дефектов (коробления, трещин и изломов).

Рисунок 12.Фото отбракованных колосников, демонтированных с обжиговой машины ОК-306

Обозначения: а – коррозионное разрушение детали (≥ 12 месяцев эксплуатации), б – коррозионное разрушение и коробление (после 18 месяцев эксплуатации), в – изломленный колосник, подверженный коррозионному разрушению (после 7 месяцев эксплуатации)

Вышеописанная статистика появилась в результате макроанализа всех выходивших из строя деталей сменным персоналом, что закреплено актами (о чем сказано ранее).

Дополнительно установлено, что процесс поверхностного коррозионного разрушения колосников протекает на её поверхности не равномерно. Так, при эксплуатации, в наибольшей степени коррозионному разрушению подвержена «верхняя» поверхность детали (плоскость контакта с окатышами), это также в достаточной степени видно на фотографиях, изображенных на рис. 12а, 12б. Из чего следует, что процесс коррозионного разрушения активно протекает в зоне обжига (в зоне максимальных температур), т.к. теплоноситель имеет максимальную температуру. Также, что доказано ранее, в зоне обжига допускаются краткосрочные перегревы колосников до 1250°С при краткосрочных остановках без отсечек газа, можно предположить, что в эти моменты процесс коррозионного разрушения верхней поверхности колосников протекает особо интенсивно.

Основываясь на достоверных данных статистики с производства, описанных ранее, можно сделать вывод, что главная причина выхода колосников из строя - их коррозионное разрушение (дефекты поверхности колосника), что составляет 95,5% из общей массы или 65,5% выбракованных только по этой причине, что является абсолютным большинством по сравнению с остальными причинами отбраковки детали. При этом, коррозия протекает на поверхности детали неравномерно. Первый, очевидный вариант борьбы с этим дефектом: уменьшение длительности пребывания колосника в зоне обжига, что может быть достигнуто сокращением простоев обжиговой машины (особенно без отсечек газа), что не всегда возможно в условиях современного производства. Поэтому, для нахождения путей устранения коррозионного разрушения поверхности детали, необходимо провести микроисследования колосников.

Второй основной статьей выхода из строя колосников является коробление (21,3%) и третьей – трещинообразование (13,2%). Предположительно, основная причина появления этих дефектов – недоработанная технология плавки и разливки, для определения чего необходимо провести дальнейшие исследования в этом направлении. Суммарный выход из строя по этим группам – 34,5%. При этом, не установлено влияние на выход из строя по этим причинам (коробление и излом) искривленных балок (исследования на производстве в этом направлении не

проводились ввиду усиления контроля за величиной прогиба балок при ремонтах обжиговых телег – проблема считалась исчерпанной).

Рисунок 13.Фото отбракованного колосника, имеющего трещину, демонтированного с обжиговой машины ОК-306

2.4 Исследование колосников для определения причин излома замковой части

Анализ 13,2% колосников, подверженных «излом замковой части» был выполнен по следующей методике: на протяжении 12-и мес, что составляет 1-ин межремонтный период ОМ ОК-306 все изъятые из эксплуатации изломленные и подверженные трещинообразованию в замковой части колосники (в том числе найденные в вакуум камерах и под ними) считались отдельной статьёй выхода из строя. При этом, при изломе проверялось наличие усадочной раковины, а также, учитывая её системное наличие, производились выборочные замеры габаритов усадочной раковины (замеры размеров раковин были выполнены на 10% изломленных колосников за период).

Так, было установлено, что все колосники имели усадочные раковины в замковых частях, а излом проходил через эти раковины (рис.15). В связи с этим фактом предприятие заказчик выполнило ряд рекламаций в сторону производителей колосников, но данных о причинах произошедшего от обоих производителей получено не было.

Рисунок 14. Фото, отбракованных после 4 месяцев эксплуатации колосников с изломами, демонтированных с обжиговой машины ОК-306

Предположение об усадочном происхождении раковин в теле колосников сделано по форме и виду дефектов (классификация дефектов выполнена по ГОСТ 19200-80). Раковины имели вид полости (пустоты) с неровной, окисленной поверхностью. При этом, по факту выполненного заказчиком выборочного разрушаемого входного контроля колосников с большими отклонениями по массе от среднего значения – было выявлено, что отклонения по массе вызваны наличием раковин усадочного происхождения в новых колосниках. Данный факт также не отрицался обоими поставщиками, но разъяснения по факту причин происхождения дефекта не были получены.

Предположено, что излом замковой части колосника происходит при наличии достаточно крупной усадочной раковины в замковой части детали (самой массивной части колосника). Дополнительным фактором может быть «зажатие» колосникового ряда подколосниковой балкой во время эксплуатации.

В результате замеров усадочных раковин колосников при выборочном контроле после изломов, установлен их минимальный диаметр – 5-ть мм, а средний - 10÷17 мм (рис. 15). Предположительно излом происходит в несколько этапов. Так, при наличии усадочной раковины достаточных размеров в колоснике возрастает градиент температур и напряжений, в результате чего колосник начинает коробится и зажиматься балками. При дальнейшей эксплуатации колосника (термоциклировании) образуется трещина в замковой части, которая, по мере эксплуатации растёт (рис. 14). В результате более длительной эксплуатации происходит излом колосника (рис. 9). Дополнительным фактором, ускоряющим процесс излома в замковой части, может стать «провисание» подколосниковой балки. Если процесс их переворота упущен обслуживающим персоналом до достижения прогиба рамы более 15 градусов – появляется риск зажатия колосников (которые всегда установлены свободно для терморасширения).

Избежать дополнительно-пагубно фактора, потенциально оказывающего влияние на изломы замковых частей колосников – искривления подколосниковых балок достаточно просто. Для этого необходимо постоянно визуально следить за

их состоянием, на производстве это возможно с помощью заведения форм учёта, таких как таблицы, журналы. Также, необходимо следить за геометрическими размерами колосников, вновь устанавливаемыми на обжиговую тележку, чтобы не допускать отступлений от геометрических размеров (и допусков) установленных ГОСТ 26645-85 [11], ГОСТ Р 53464-2009 [12] и ГОСТ 3212-92 [13].

Рисунок 15. Фото излома замковой части колосника во время эксплуатации (представленного на рис. 13, в, в центре усадочная раковина Ø=0,7мм)

2.5 Исследование колосников для определения причин коробления

Исходя из статистических данных, описанных ранее, 21,3 % колосников были подвержены короблению. Для определения причин, вызывающих коробление, были проведены макроисследования коробленых колосников после эксплуатации.

В результате исследований были установлены причины происхождения данного дефекта.

В первую очередь определено, что колосники коробятся по одной схеме (по одному принципу), изгиб всегда направлен вверх, в сторону максимальных температур при эксплуатации (в сторону горелок, если считать, что колосник установлен а балках). На рис. 12б и 16 представлены фотоматериалы, доказывающие единообразие схемы коробления колосников при эксплуатации.

Рисунок 16. Короблeный колосник с коррозией (разрезанный на участки для поиска усадочных раковин) после 16 мес эксплуатации

Коробление по описанному принципу может обосновываться наличием градиентом температур в колосниках при их эксплуатации. Если учесть, что просос

теплоносителя через слой, в зоне высоких температур, осуществляется сверху вниз (нисходящий поток), первоочередному и максимальному нагреву подвергается верхняя поверхность колосника, а соответственно и наибольшему расширению, в результате чего образуется разница температур, колосник коробит именно по обнаруженной схеме (схожий алгоритм описан авторами [58]). Данный принцип найдет отражения в дальнейшем моделировании процесса эксплуатации.

Так как короблению подвержена только часть колосников (21,3%) – необходимо было найти те различия, из-за которых развитие дефекта становится возможным.

Рисунок 17.Средняя часть колосника (изображенного на рис. 16)

Исходя из соображений, что в коробленых колосниках теплопроводность была меньше, чем в не коробленых, были проведены выборочные исследования демонтированных коробленых колосников, с целью обнаружения в них усадочных раковин (большие объёмы данных собрать не удалось ввиду сложностей в процессе разреза колосника на части на производстве – это достаточно трудоёмкий процесс). Соответственно отобранные колосники резались на участки, разрезы

производились исходя из расположения прибылей в детали во время литья, а также поперек массивных частей детали.

Один из исследованных колосников представлен на рис. 16. Он был распилен на части, изображения которых представлены на рис. 17 и 18.

Анализ разреза средней части колосника (рис. 17) показал, что вся средняя часть колосника поражена усадочными раковинами разного размера, прерывающимися, но расположенными во всём теле участка детали, через тело усадочной раковины проходят трещины, образовавшиеся во время эксплуатации. Размеры усадочных раковин в средней части детали: самая маленькая 2х2х1 мм (длинна х ширина х высота), самая крупная (изображенная на рис. 17) 14х5х55 мм.

Анализ разреза замковой части колосника, которая является самой массивной, показал наличие внутри этого участка детали самую большую усадочную раковину с размерами 35х12х37 мм (рис. 18). Это свидетельствует о не достаточной прибыли в этом узле, соответственно о не оптимальной схеме формовки колосников – партия заливалась «в стопку».

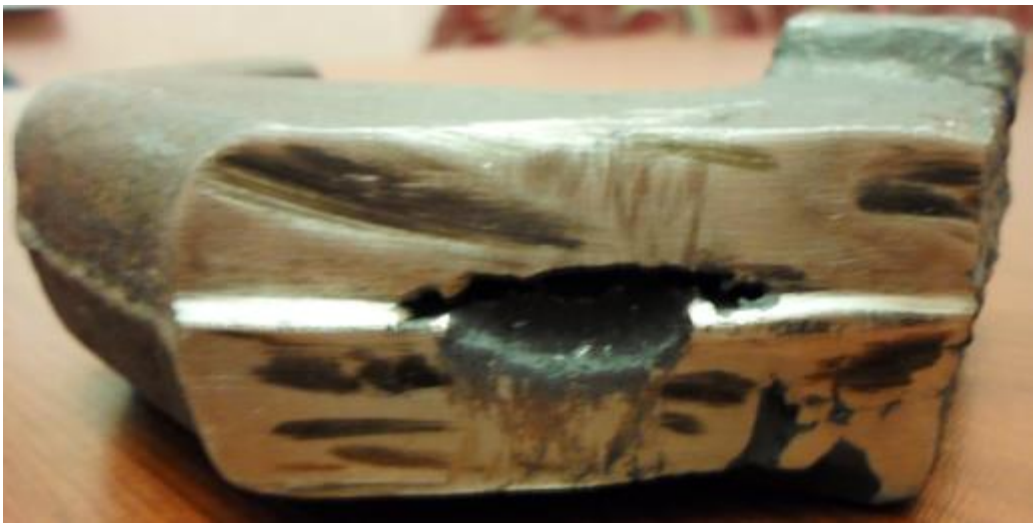


Рисунок 18.Замковая часть колосника (изображенного на рис. 16)

В участках колосника, где крупные усадочные раковины отсутствовали, присутствовала усадочная пористость, количество пор и их размеры увеличивалось от краёв к центру отливки (рис. 19). Характер расположения пористости объясняется общей теорией затвердевания отливки: чем больше интенсивность

отвода тепла, тем меньше пустот в этих участках. В середине разреза усадочная пористость имеет максимальное распространение и крупность, т.к. отвод тепла из центра детали при литье минимален (кристаллизация отливки заканчивается в её центре).

Анализ остальных выбранных для анализа коробленых колосников показал, что в 100% случаев в замковой части присутствовала крупная усадочная раковина (от 10-и мм в диаметре).

Таким образом, следует вывод, что причиной обильного поражения тела детали усадочными раковинами является не качественная технология производства колосников (их выплавки и литья), из возможных причин можно выделить: повышенную температуру стали перед разливкой и недостаточность количества или неправильность расположения литейных прибылей. Учитывая, что все партии проходили тщательный входной контроль, даже на этапе выборочного взвешивания не было выявлено предпосылок низкого качества деталей, можно сделать вывод, что несовершенство технологии плавки и литья колосников является основной причиной выхода их в брак по причине коробления.

Так, при разливке в "стопку" или используя разливочный ковш сталь необходимо перегревать, во избежание преждевременного процесса затвердевания. То, что колосники разливаются стопками, может быть объяснением обильного поражения усадочными раковинами только части колосников, т.к. проходя вниз по стопке сталь остывает. Влияние перегрева стали на кинетику затвердевания и структуру закристаллизовавшейся стали хорошо проанализировано в ряде работ, например в работе Китаева Е. М. расчетами показано, что перегрев на 40-50ºС приводит к увеличению продолжительности затвердевания металла на 6-10% [59].

Стоит отметить, что повышенная температура заливки также может увеличить склонность детали к трещинообразованию, что также может объяснять этот дефект в колосниках. Авторами [25] доказано, что повышенная температура заливки стали повышает склонность отливки к трещинообразованию, так температура стали в ковше перед разливкой для отливок с трещинами определилась в 1581°С и в 1562°С для отливок без трещин [25]. Также, помимо

того, что перегрев стали перед разливкой резко увеличивает количество внутренних дефектов отливки, заметно увеличивается и количество поверхностных дефектов, так, уже при незначительном перегреве стали (уже при 10°С) частота возникновения поверхностных дефектов возрастает на 10÷40% [60].

Рисунок 19. Разрез средней части колосника (изображенного на рис. 16)

Ключевой причиной выхода из строя колосников (приводящей к трещинам, изломам, короблению) является наличие в них раковин усадочного происхождения, что объясняется несовершенством технологии выплавки и литья колосников. Таким образом, необходимо исключить возможность образования при литье колосников усадочных раковин любого размера, этого можно добиться за счет изменения технологии их формовки и разливки в сторону ухода от разливки «в стопку», также необходимо предусмотреть достаточное количество прибылей для питания отливки в замковой части.

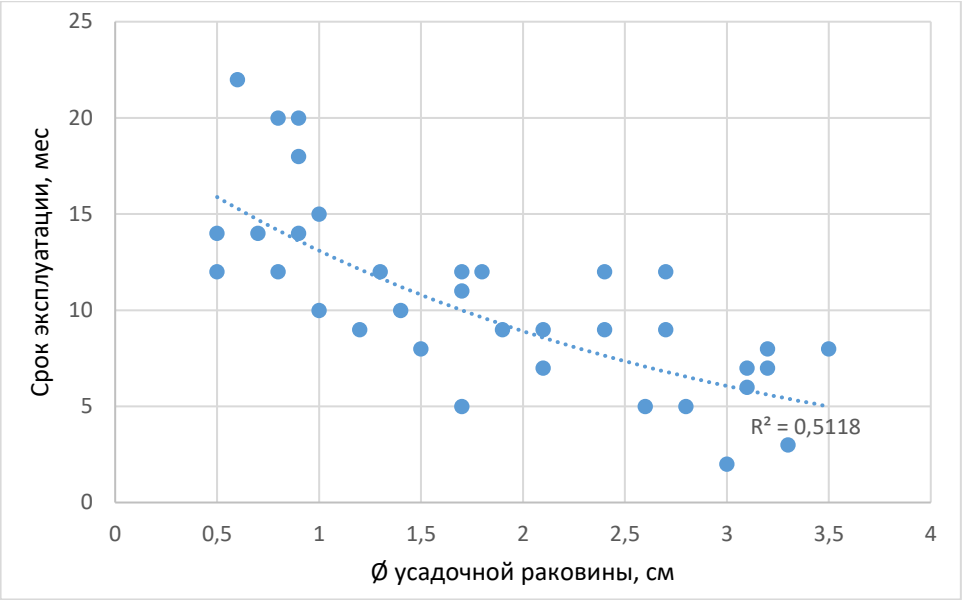


Рисунок 20.Зависимость срока эксплуатации от размера усадочной раковины с экспоненциальной линией тренда, достоверность аппроксимации R^2=0,52

Учитывая, что причина коробления и изломов колосников – 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 (путем разрезания на части), найденные пустоты замерялись штангенциркулем для установления диаметра усадочной раковины, фиксировалось среднее значение диаметра.

Дополнительная погрешность, влияющая на величину достоверности аппроксимации, вносится следующими факторами:

- при выходе колосников из строя фиксируется не дата реального выхода из строя, а дата переборки обжиговой тележки,
- при изломе колосника во время эксплуатации и падении в вакуум-камеру дата его выхода из строя фиксируется приблизительно,
- при переборках телег могли использоваться б/у колосники, ввиду производственных факторов, несмотря на запрет таких действий на срок проведения эксперимента.

Таким образом, достичь желаемой величины достоверности аппроксимации $R^2 \geq 0,6$ на реальном производстве не удалось по ряду объективных причин. Но при этом, зависимость эксплуатационного ресурса от размеров усадочной раковины (рис. 20) все-же возможно установить: при требуемом сегодня сроке эксплуатации колосников минимум 2 года (на некоторых производствах – минимум 3 года, как на АО «СГОК») – максимально допустимый средний диаметр усадочной раковины не должен превышать 5 мм.

Дополнительно следует отметить, что в изломленных и коробленых колосниках не обнаружены усадочные раковины средним диаметром менее 5 мм.

2.6 Исследование колосников для определения причин и механизма протекания коррозионного разрушения «верхней» поверхности во время эксплуатации

Были выполнены металлографические исследования на ОМ ОК-306 для установления причин дефектообразования, приводящего к выходам из строя. Анализу подвергались колосники на всем протяжении эксплуатационной жизни (новые, б/у, брак). Изучались: степень разрушения колосников, коррозия.

Микроанализ выполнялся на анализаторе изображений THIXOMETPRO (микроскоп MEIJITECHNOIM 7200, камера и ПК). Для травления применялся раствор «Марбле», широко применяемый для травления структуры сталей аустенитного и аустенитно-ферритного классов. Состав: 100 см^3 этилового спирта 20 г медного купороса, 100 см^3 соляной кислоты [61].

Рисунок 21.Фото после шести месяцев эксплуатации

Обозначения: а – колосниковая решетка, б – поверхность контакта колосника с окатышами

Микроанализ показал, что уже после 6-и мес в колосниках развивается межкристаллитная коррозия (МКК) преимущественно у у плоскости контакта с окатышами (это верхняя часть колосника, подверженная наибольшим перегревам) см. рис. 21а,б. Нужнот отметить что МКК сопровождает большую часть всех выбракованных колосников (рис. 12а,б и рис 16).

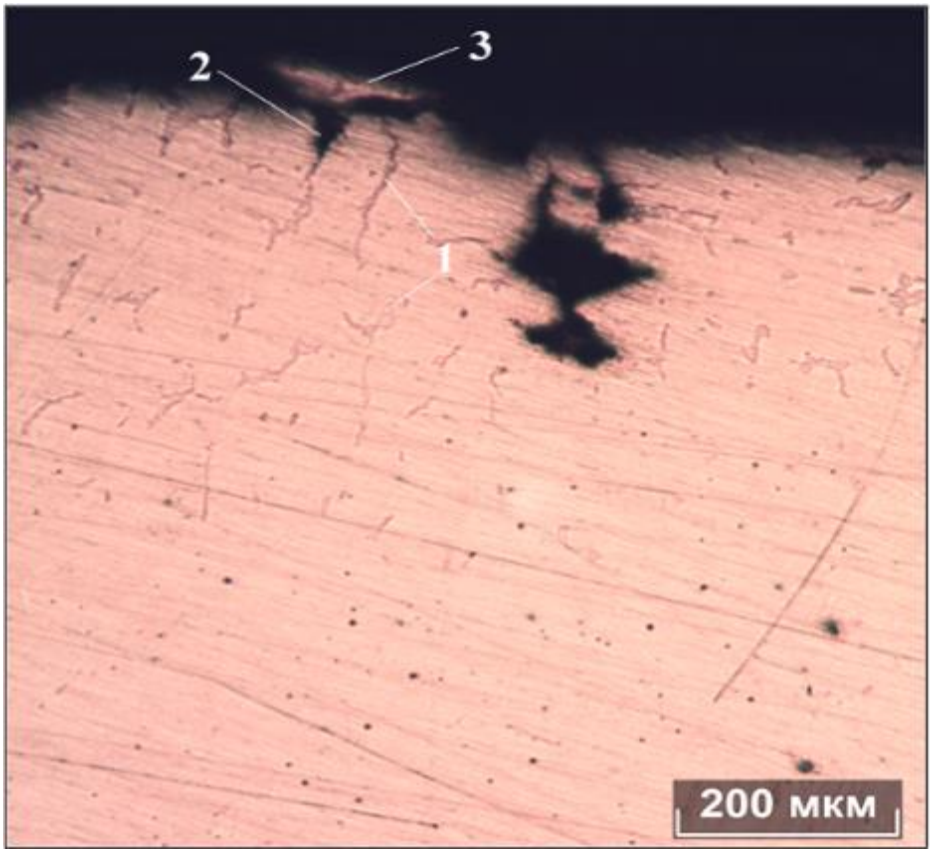


Рисунок 22. Шлиф поперечного разреза колосника после шести месяцев работы, полировка без травления, увеличение х150

Обозначения: карбиды хрома 1, МКК по границам карбидов 2 и локально отслаивающиеся участки 3

Уже после шести месяцев эксплуатации на не травленом шлифе хорошо различима МКК (рис. 22): крупные карбиды хрома с большой протяжённостью границ *1*, коррозия, распространяющаяся по границам таких карбидов *2*, локальные отслаивание матрицы металла по карбидам *3*. Хорошо различимо, что плотность выпавших карбидов резко уменьшается на глубине ≥ 500 мкм от плоскости

поверхности. В других плоскостях МКК не наблюдалось. Таким образом, МКК развивается на всем протяжении срока эксплуатации колосников и хорошо разлечима на 6-ом месяце эксплуатации. Корозия имеет выраженный межкристаллитный характер и развивается по границам зёрен, где формируется достаточно толстая карбидная сетка (рис. 22).

Выводы о присутствии карбидов хрома можно считать достоверными, исходя из данных замеров спектрограмм структурынах элементов [1, 20, 29] в колосниках из стали 40Х24Н12СЛ, полученных с использованием растрового электронного микроскопа с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа ф. «JEOL» (Япония), исследователи делают вывод, что в стали 40Х24Н12СЛ присутствуют выделения карбидов хрома $[Cr, Fe]_{23}C_6$, идентично хорошо выделемые в структуре стали (ввиду их повышенной твёрдости по сравнению с матрицой металла при механической подготовке шлифа).

Исследования колосников после литья показали значительно меньшую плотность и размеры карбидной фазы в матрице металла, отсутствие локальной МКК, равномерное распределение карбидов по всей плоскости разреза (рис. 24, а).

Исследования показали развитие коррозии в колосниках по механизму МКК, описанному [9, 27] авторами, для хромоникелевых нержавеющих сталей аустенитно-ферритного класса после закалки (с пересыщенным аустенитом) с содержанием углерода более 0,005 %. Авторы делают вывод о том, что МКК протекает на границах зёрен с образованием карбидной фазы ($M_{23}C_6$) с участием всего углерода в матрице металла, а хрома, лишь из приграничных участков, таким образом, появляются зоны с пониженным содержанием хрома (менее 12 %) у границы зёрен. 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 МКК (рис. 23) под воздействием высоких температур.

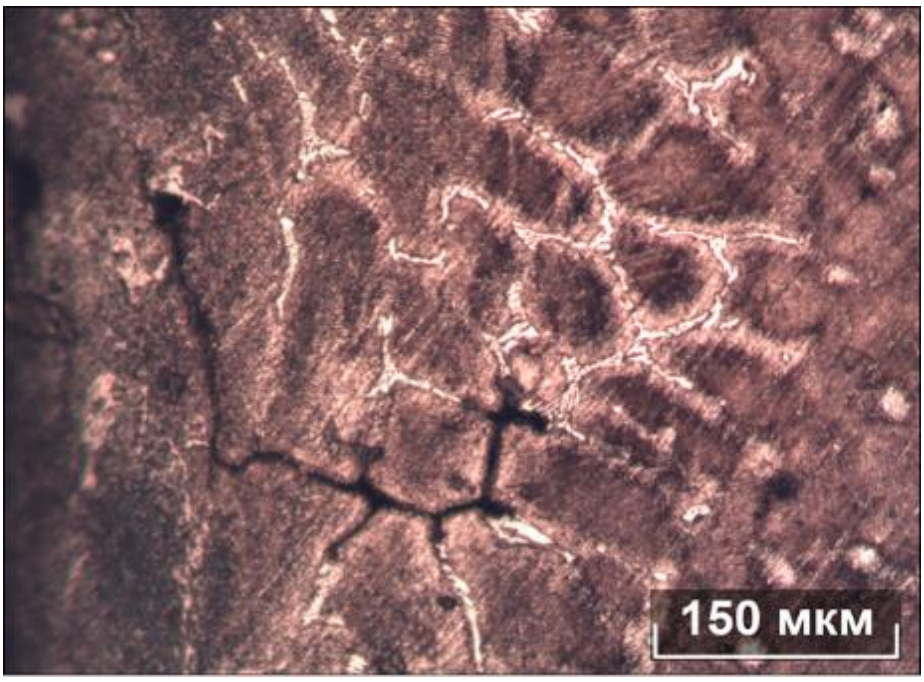


Рисунок 23.Шлиф поперечного разреза колосника после шести месяцев работы, полировка с травлением «Марбле», увеличение х500

Хорошо известно, что выделение карбидной сетки происходит в интервалах t=500 ÷ 950°C. Карбид $Cr_{26}C_6$ выделяется в твердом растворе по границам зёрен олько в этих интервалах температур [62]. Как установлено ранее, поверхность колосниковой решетки при эксплуатации прогреваются до таких температур.

Стоит отметить, что помимо карбидов в структуре стали при таких температурах эксплуатации, также может выделятся σ-фаза. Рядом исследователей установлено [9, 60, 63, 64], что выделение σ-фазы в хромоникелевых аустенитно-ферритных сталях происходит при температурах 565 – 925°C, но она может возникать только при концентрациях хрома 23% и выше. Микротвердость σ-фазы в стали содержащей 20-23% хрома составляет 6570÷8512 МПа, а аустенитной фазы 1755÷2010 МПа, при этом, образование σ-фазы (фазовый переход) происходит с изменением объёмов (ввиду высокой плотности σ-фазы), из чего следует что хрупкая σ-фаза может провоцировать трещинообразование при термоциклировании.

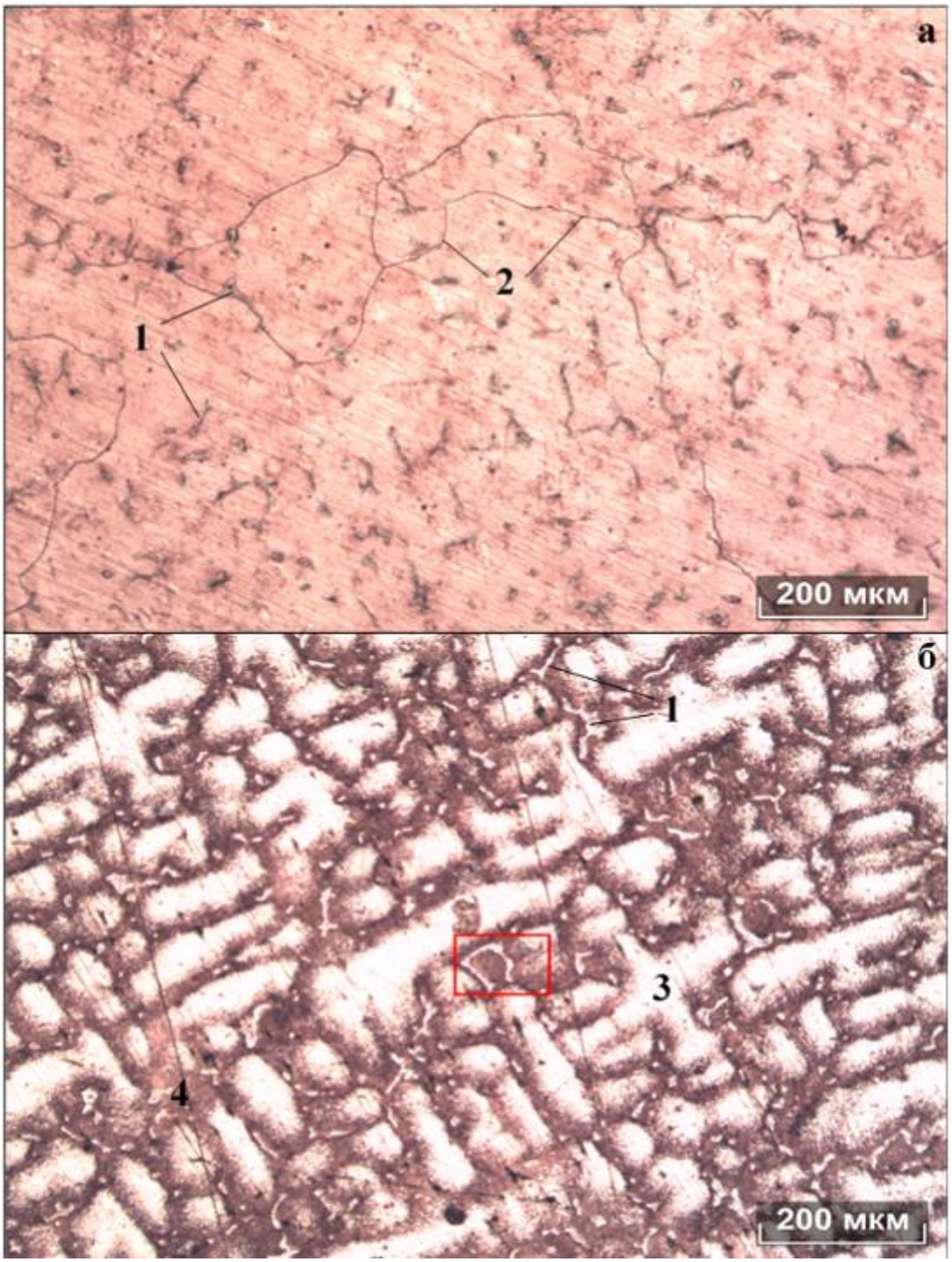


Рисунок 24. Исследования в 5 мм от поверхности контакта с окатышами на шлифах: а – литых, б – 8 мес эксплуатации (выделенная зона будет изучена под большим увеличением (рис. 25)), увеличение х150

Обозначения: 1 –карбиды, 2 – границы фаз, 3 – ось дендритов, 4 – междендритные участки

Далее были проведены исследования в 5 мм от «верхней» поверхности колосников до и после 8 месяцев эксплуатации из одной плавки (рис. 24). В колосниках после 8-месяцев эксплуарации (рис. 24, б) наблюдаются не только зернограничные выделения карбидов *1* по всему объему колосника и увеличение размеров ранее выделившихся карбидов, но и массовое выделение карбидов в теле зерен, которым соответствуют междендритные или «затемнённые» участки *4*. Плотность выделения карбидов в теле зерен имеет высокую степень неоднородности. Наибольшая плотность каридов наблюдается в зонах эвтектических карбидов (в участках, сооветствующим междендритным участкам *4*). В участках, соответствующим осям дедритов *3*, плотность выделения карбидов многократно ниже (рис. 24, б). Последнее свидетельствует о высокой степени развития дендритной ликвации. Необходимо отметить, что оба шлифа травились одним травителем с одинаковым временем травления, но дендритное строение (оси дендрита *3* и междендритные или «затемнённые» участки *4*) до эксплуатации не различимо.

Было проведено исследование междендритного участка, отмеченного красным на рис. 24, б, при большем увеличении. В результате установлено, что «затемнение» в междендридных участках вызвано большим количеством мелких карбидов (рис. 25, а). Исходя из изложенного следует, что в междендритных участках во время эксплуатации обильно идет процесс выделения, коагулирования и укрупнения карбидов.

При изучении границ зёрен на шлифах колосников после литья (до эксплуатации) был обнаружен дефект структуры неразличимый при малых увеличениях: сплошная карбидная сетка по границам зёрен толщиной от 1 до 2,5 мкм (рис. 25, б). Что является свидетельством протекания процесса карбидообразования по границам зёрен в относительно небольших объёмах в процессе остывания отливки.

В результате исследования установлено, что в колосниках наблюдаются три основные фазы: аустенитная марица, незначительные выделения ферритной фазы

и карбиды с разной формой выделения (рис. 24). По форме выделения карбиды можно разделить на 3 группы:

- крупные, скелетообразной формы;
- очень тонкие сплошные выделения по границам первичного аустенитного зерна;
- глобулярные вытянутой формы, выделяющиеся на границах зерен и округлые мелкие, выделяющиеся в теле зерен.

образующийся в первичной литой структуре, её размер и распределение.

Карбиды скелетообразной формы образовались по эвтектическому механизму, о чем свидельствует их форма и выделение совместно с сульфидами (серым цветом [1, 20, 29]), которые различимы на рис. 25, а. Вытянутые глобулярные карбиды на границах зерен и округлые мелкие в теле зерен образовались в процессе эксплуатации колосников, т.к. прослеживается явная связь плотности их выделения с условиями и временем эксплуатации колосников. Схожий принцип отмечен авторами [53]: решающее влияние на окалиностойкость и ростоустойчивость при высокотемпературном окислении оказывает тип карбидной фазы,

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что карбидообразование идет с самого начала эксплуатации колосников, а выраженное развитие межкристаллитной коррозии детали начинается с 3-го месяца эксплуатации, после образования в поверхностной зоне сплошной сетки карбидов на границах дендридов. Процесс карбидообразования идет во всем объеме колосника, при этом с наибольшей интенсивностью процесс протекает в «верхней зоне» детали (подверженнй коррозии, о неравномерности протекания которой в теле детали говорилось ранее), что может объясняться большим градиентом температур по сечению детали во время эксплуатации, обусловленного технологией эксплуатации и низкой теплопроводностью стали.

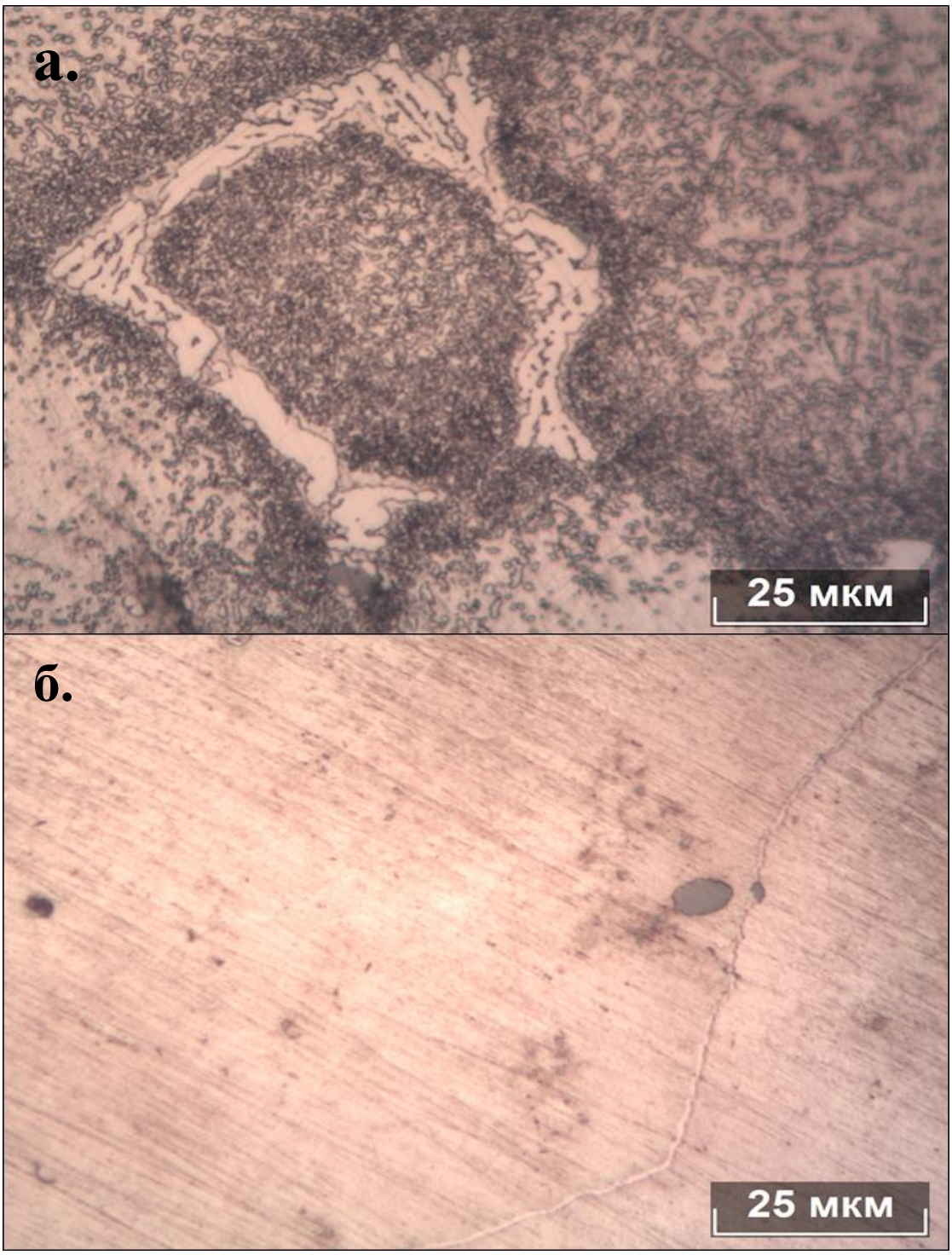


Рисунок 25. Сравнительный анализ микроструктур

а. Увеличения участка выделения рис. 24, крупный карбид и большое количество мелких карбидов вокруг, фаза окрашенная серым цветом – сульфид [1, 20, 29], 8 мес в работе;

б. Карбидная сетка по границам зёрен после литья, увеличение х1500

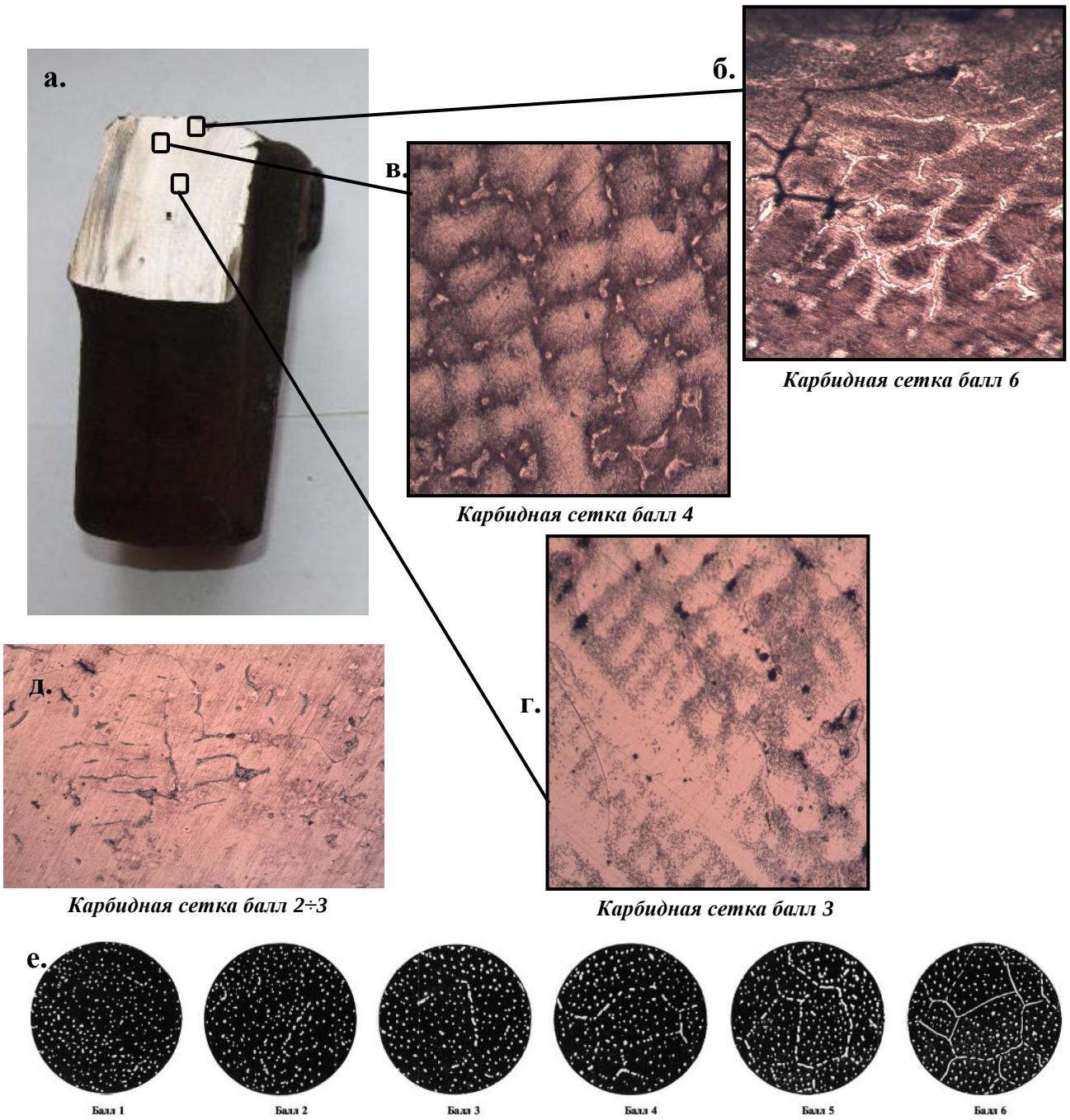


Рисунок 26.Сравнение полученных графических данных с эталонами по ГОСТ 8233-56 [65]

Обозначения:

а. Исследуемый колосник после 8-и месяцев эксплуатации;

б. Микроструктура «верхней» поверхности колосника (до 500 мкм от края детали), х500, карбидная сетка балл 6;

в. Микроструктура в 5 мм от верхней поверхности колосника, х500, карбидная сетка балл 4;

г. Микроструктура середины колосника, х500, карбидная сетка балл 3;

д. Микроструктура нового колосника (до эксплуатации), х500, карбидная сетка балл 2÷3;

е. Эталоны карбидной сетки по ГОСТ 8233-56 [65].

Для наглядности неоднородности распределения карбидов в теле колосника после 8-и месяцев эксплуатации полученные данные возможно изобразить графически в стравнении с эталонами по ГОСТ 8233-56 [65] (рис. 26). Анализ выполнен локально, не смотря на рекомендации ГОСТ 8233-56: «оценку карбидной сетки проводят сравнением наихудшего по включениям поля зрения, встречающегося при просмотре площади поле шлифа, с соответствующими шкалами настоящего стандарта», так как очевидна высокая степень неоднородности карбидной сетки по высоте колосника (от верхнего края в глубь).

В центре детали после 8-и месяцев эксплуатации (рис. 26, г) размеры карбидов сохраняются в сравнении со структурой колосника до эксплуатации (рис. 26, д, карбидная сетка балл 3), единственным отличием можно считать обильное выделение карбидов хрома не значительных размеров в затемнённых участках (что хорошо различимо при большем увеличении – рис. 25, а). Чего нельзя сказать о близких участках к «верхнему», подверженному МКК, краю детали (0,5÷5,5 мм от края, рис. 26, в). Карбиды в этой зоне укрупнились, плотность мелких карбидов возросла (карбидная сетка балл 4). Наконец на расстоянии до 500 мкм от верхнего края детали (рис. 26, б, контактная с окатышами поверхность, обращённая в сторону горелок) видна сплошная карбидная сетка (карбидная сетка балл 6).

Необходимо отметить, что достоверное параметрическое описание скорости диффузии углерода в аустените легированным хромом на сегодняшний день не изыскано. Некоторые авторы предпринимали попытки применить формулу для учета дополнительного эффекта легирования элементами замещения. Но предлагаемые модифицированные формулы не учитывают эффективную энергию активации диффузии углерода и не могут быть приняты в расчет [11].

В основном, попытки использования учета эффективной энергии активации приводят к сложным эмпирическим зависимостям с трудно подбираемыми коэффициентами, что затрудняет их использование. По этой причине для численного моделирования диффузии углерода в аустените Fe-C-Cr авторами работы [11] было применено моделирование. Один из основных выводов этой работы – высокая скорость диффузии углерода в аустените стали 15Х. Так, при

нагреве до 855°С диффузия углерода на глубину 0,5÷1,2 мм произошла за 5÷10 часов (рис. 27,а,б). На скорость диффузии С влияет его концентрация в матрице, а также концентрация элементов замещения (в том числе карбидообразующих), температура. Температура нагрева колосников на современных обжиговых машинах ~1000°С (рис. 27,в), длительность температурного воздействия ~60 минут в сутки (12 циклов по 5÷8 мин), что доказывает наличие достаточных условий для диффузии углерода со всей глубины детали при выравнивании его концентрации в матрице металла после выпадения углерода и хрома в карбиды $[Cr,Fe]_{23}C_6$ в поверхностном слое (≤500 мкм от плоскости контакта с окатшами) колосника.

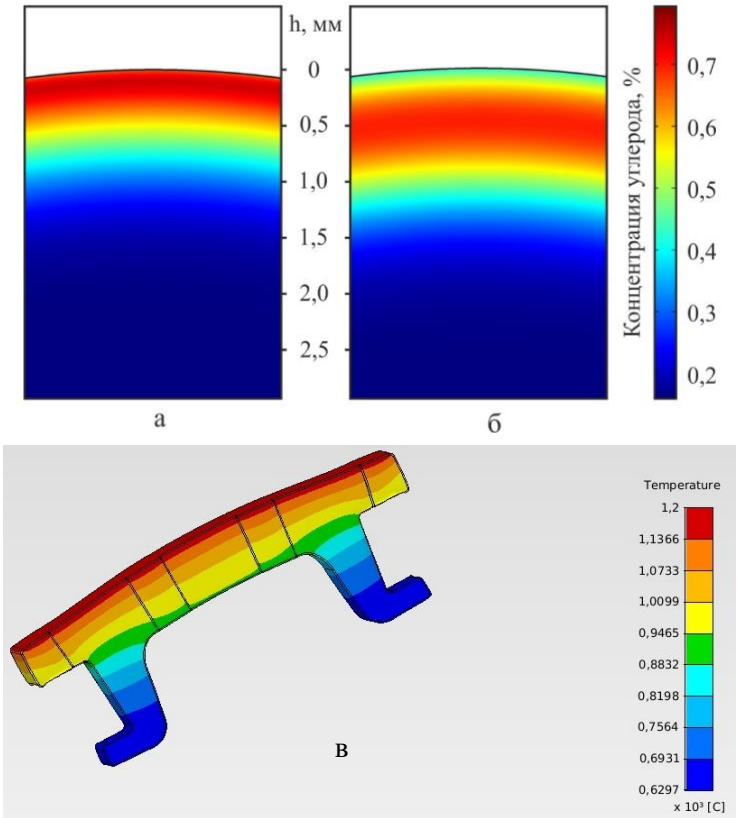


Рисунок 27. *а, б – содержание С в стали 15Х после 5/10-и ч одно- и двухстадийного процесса цементации соответственно, в - распределение температур в колосниках (зона обжига, пребывание – 5 мин).*

В пользу описанного механизма говорят и экспериментальные данные – МКК продолжает развиваться от верхней поверхности колосника на всем сроке его

эксплуатации, при этом нижняя и боковые поверхности практически не подвержены МКК, так как прогреваются до меньших температур (рис. 27,в).

Основываясь на изложенном, возможно сделать вывод, что МКК в стали 40Х24Н12СЛ развивается по мере формирования сплошной достаточно широкой карбидной сетки на границах зерен. Чем крупнее первичное зерно аустенита, тем протяжённее сплошные выделения карбидов и тем активнее будет развивается МКК. Первичное зерно аустенита, так же как степень развития дендритной ликвации, определяются условиями разливки – температурой заливки и скоростью отвода тепла (что влияет на размеры дендритов). При этом карбидная структура (особенно в поверхностных зонах) преимущественно формируется в процессе эксплуатации. Повышения срока службы колосников можно добится за счёт:

- снижения размера дендритов и, как следствие, размера аустенитного зерна и степени развития дендритной ликвации, этого можно достичь, изменением технологии разливки (в сторону уменьшения температуры металла перед разливкой), а также, применив термообработку для изменения параметров литой структуры или разливку на вибростендах для уменьшения степени ликвации и размеров первичных карбидов;

- стабилизации структуры и управления выделением карбидов (созданием благоприятных условий для выделения мелких карбидов глобулярной формы) чего можно достичь в результате термической обработки, также снизить интенсивность процесса карбидообразования можно за счет снижения содержания углерода, что нежелательно, так как сместит аустенитно-ферритный баланс в стали, что может привести к новой проблеме – фазовому переходу аустенит↔феррит (с изменением плотности и объёмов) при эксплуатации.

В результате исследования можно сделать вывод, что корозионное разрушение колосников из стали 40Х24Н12СЛ протекает по механизму МКК. Что связано с карбидообразованием, протекающим преимущественно в процессе эксплуатации, и высокой степенью дендритной ликвации. Предположительно изменение технологии разливки и применение термической обработки (и возможно, разливки на вибростендах), направленное на стабилизацию структуры и

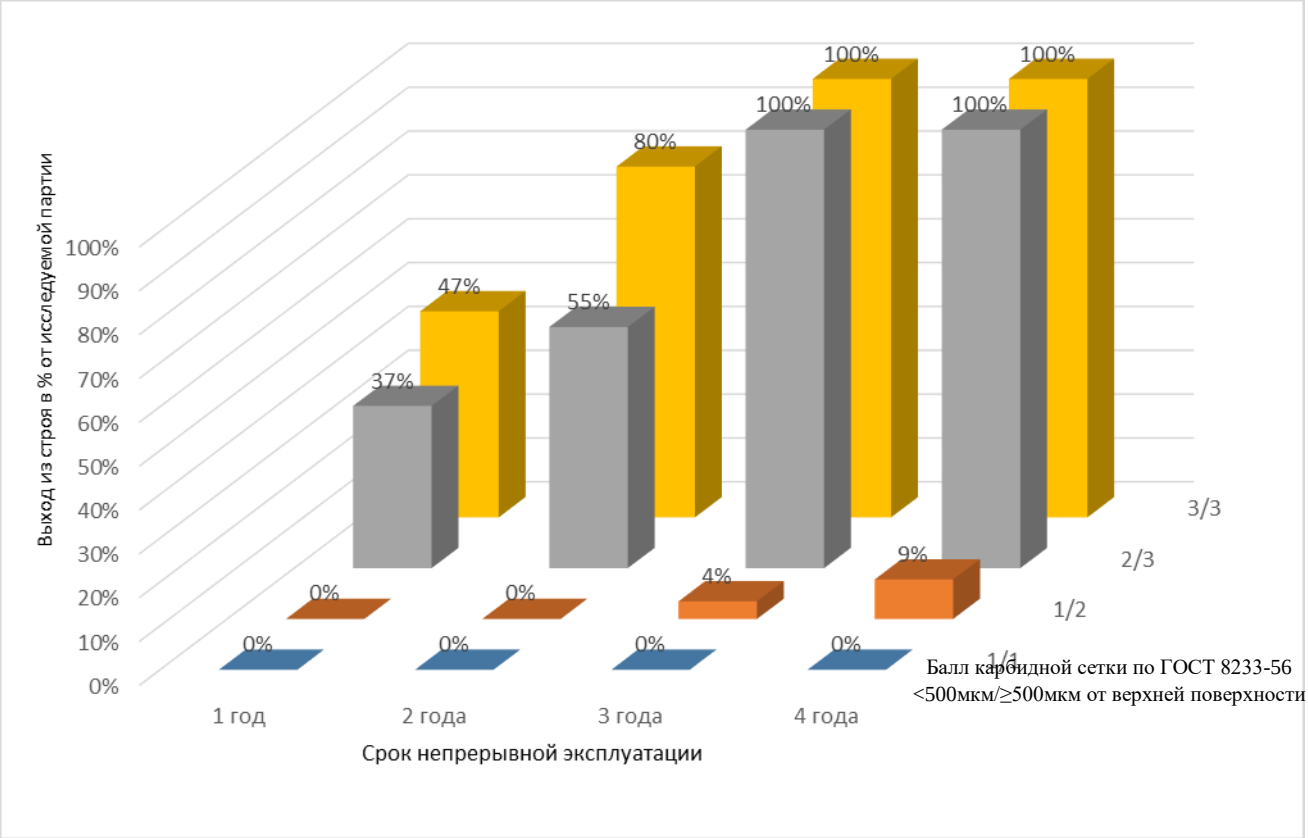
выделение карбидов, преимущественно глобулярной формы на всю глубину колосника, позволит существенно повысить сопротивляемость колосников МКК. Определены теоретические предпосылки развития процесса карбидообразования при нахождении колосника в зоне обжига (зоне максимальных температур), соответственно, можно предположить, что сокращение простоев оборудования обжиговой машины, которые производятся без отсечек газа, приведет к увеличению срока службы колосников. Процесс коррозионного разрушения детали, предположительно по механизму МКК, имеет наибольшее развитие только с одной стороны детали, той, которая направлена в сторону противоположную направлению теплоносителя в зоне обжига. Также установлено, что в структуре стали после литья, присутствует тонкая карбидная сетка по границам зёрен, что понижает эксплуатационный ресурс изделия, выходом также будет термообработка детали после литья.

По итогу, учитывая вышеописанные данные по статистике дефектообразования и зная средний балл карбидной сетки по ГОСТ 8233-56 каждой партии у верхней поверхности (на глубине <500мкм) и в центральной части детали (на глубине ≥500мкм) при прочих равных возможно оцифровать зависимость срока эксплуатации от балла карбидной сетки. Срок эксплуатации в данном случае характеристика склонности к МКК, так как это единственная статья выхода из строя по всем партиям. Зависимость представлена на рис. 28.

Исходя из зависимости рис. 28 можно сделать следующие выводы:

- для высокой склонности к 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 по ГОСТ 8233-56;
- для определения склонности к МКК колосников из стали 40Х24Н12СЛ по ГОСТ 8233-56 не достаточно замерять балл карбидной сетки одной области, минимально-необходимые замеры: 2-а замера на глубине менее 500 мкм и более 500 мкм от плоскости контакта с окатышами;

- новые колосники после закалки имеют разный балл карбидной сетки у поверхности (<500 мкм) и в глубине детали (≥500 мкм), при этом у поставщиков 1 и 2 термообработка практически не уменьшила размеры первичных карбидов, они показали самую низкую стойкость против МКК.



Поставщик	Партия, шт	Срок эксплуатации	Выходы из строя в % от исследуемой партии в зависимости от балла карбидной сетки на глубине: менее 500 мкм и более 500 мкм от плоскости контакта с окатышами			
			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 28.Зависимость срока эксплуатации или склонности к МКК от балла карбидной сетки на глубине <500 мкм/≥500 мкм от верхней поверхности

2.7 Выводы

1. Установлено, что при эксплуатации колосников обжиговых тележек возникает 3-и основных дефекта, выбраковка и выход из строя по которым в 7 раз превышает потери по угару: поверхностная коррозия (65,5%), коробление (21,3%) и трещинообразование с последующим изломом (13,2%). МКК - основная причина выхода из строя колосников из стали 40Х24Н12СЛ.

2. Установлено, что существует 2-е основные причины возникновения дефектов, составляющие основную массу вышедших из строя колосников (сдачи их в металлолом и потерь при эксплуатации): поверхностная межкристаллитная коррозия, составляющая 65,5% выходов из строя и усадочные раковины в теле детали, приводящие к 34,5% выходов из строя.

3. Установлено, что ГОСТ 977-88 не содержит достаточное количество требований, которые позволят обеспечить воспроизводимость удовлетворительных эксплуатационных свойств колосников обжиговых тележек.

4. МКК протекает преимущественно у поверхности контакта с окатышами и теплоносителем.

5. Установлено, что излом замковых частей колосников происходит при наличии в колоснике усадочных раковин диаметром более 5-и мм, предположительно литейного происхождения и, возможном, зажатии колосникового ряда балками, на который он установлен.

6. Установлено, что при эксплуатации создаются достаточные условия для МКК (температурное воздействие). Усадочные раковины являются главной причиной брака колосников после МКК, за счет снижения теплопроводности матрицы они приводят к короблениям и изломам. Устранить дефект предлагается за счёт изменения технологии разливки стали (уменьшения температуры заливки стали в формы, изменения схемы формовки и разливки, изменения места расположения, количества и массы прибылей и других факторов).

7. Установлена зависимость размера усадочной раковины и срока эксплуатации колосников, для достижения эксплуатационного ресурса не менее 24

мес. необходимо обеспечить устранить усадочные раковины Ø≥5мм. В изломленных и коробленых колосниках не обнаружены усадочные раковины средним диаметром менее 5 мм.

8. Установлена зависимость срока эксплуатации или склонности к МКК от балла карбидной сетки по ГОСТ 8233-56. Установленная связь между баллом карбидной сетки на глубине от 500 мкм.

9. Определен механизм МКК колосника.

- Установлено, что после 6 месяцев эксплуатации на колосниках появляются различимые признаки коррозионного разрушения, которое протекает со всех сторон детали не равномерно. Наибольшее распространение коррозия имеет у верхней поверхности колосника.
- Процесс коррозионного разрушения имеет максимальное распространение в зоне обжига.
- Карбиды продолжают выделятся расти и коагулироваться на всем протяжении эксплуатации детали. Процесс имеет наибольшее распространение в междендритных участках.
- Установлено, что процесс карбидообразования протекает с момента выплавки колосников (заливки стали в форму). В результате, если не производить термическую обработку после разливки, в стали будет присутствовать карбидная сетка толщиной 1-2 мкм.

Для повышения эксплуатационного ресурса колосников необходимо избежать образования МКК и выделения крупных карбидов в структуре стали, чего можно добиться за счёт корректировки химического состава стали и стабилизации её структуры термической обработкой, а также за счет исключения усадочных раковин (предположительно литейного происхождения), усовершенствовав технологию литья детали.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛИТЫХ КОЛОСНИКОВ ИЗ СТАЛИ 40Х24Н12СЛ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В 34,5% брака колосников усадочные раковины являются причиной, вызывающей дефекты (такие как коробление и трещинообразование с последующим изломом [66]). Количество эксплуатируемых колосников подверженных дефектообразованию, а также подробное описание дефектов представлено ранее. Однако, для непосредственного установления причин дефектообразования информации, представленной ранее, не достаточно. В связи с этим, для описания процесса дефектообразования, было применено математическое моделирование процесса эксплуатации колосников.

3.1 Условия и методика моделирования

Математическое моделирование физических процессов протекающих в теле колосника во время эксплуатации позволяет получить данные о схемах напряжённо-деформированного состояния и распределения температур в глубине металла. Как установлено ранее, дефекты в колосниках расположены внутри детали, ближе к центру симметрии, поэтому физически пронаблюдать процесс дефектообразования невозможно. Метод математического моделирования позволит наиболее эффективно, с меньшими материальными и временными затратами выявить процессы, протекающие в глубине металла.

Был применен программный комплекс, способный решать единовременно тепловую и прочностную задачи и дать полные и достоверные результаты. На сегодняшний день, этим требованиям отвечает программный инженерный комплекс ANSYS.

ANSYS — универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет, является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчётов (CAE, Computer-Aided Engineering) и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики

деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики [67]. Основной особенностью программы является возможность решения связанных задач типа «теплообмен-прочность». Поскольку решаемая в диссертационной работе задача относится к такому типу задач, это обусловило выбор программного инженерного комплекса ANSYS для её решения.

Метод конечных элементов (МКЭ) — это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики.

Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов) соединённых между собой в узлах. В каждом из элементов, на первом этапе решения, произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах этих элементов. В результате составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разрежённый вид, что существенно упрощает её решение [67].

Если использовать матричные термины, то собираются так называемые матрицы жёсткости (или матрица Дирихле) и масс. Матрица жёсткости (матрица Дирихле) — матрица особого вида, использующаяся в методе конечных элементов для решения дифференциальных уравнений в частных производных. Она также

применяется при решениях задач электродинамики и механики [68]. Решение задач с применением МКЭ предусматривает составление (и дальнейшее решение) системы алгебраических уравнений. В общем, полученная система уравнений отражает условия равновесия (как теплового так и механического). Решение этих уравнений позволит получить значения узловых параметров (т.е. решить задачу) [69].

Метод конечных элементов сложнее метода конечных разностей в реализации. У МКЭ, однако, есть ряд преимуществ, проявляющихся на реальных задачах, так, МКЭ позволяет использовать произвольную форму обрабатываемой области; сетку можно сделать более плотной в тех местах, где необходима особая точность [67].

Решение связанных задач типа «теплообмен-прочность» в общем случае производится последовательно: в начале решается тепловая задача с учетом имеющихся граничных условий теплообмена. После этого, полученные данные (значения температур с узлах модели), переносятся в прочностную задачу. В результате чего, рассчитываются значения напряжений, деформаций и т.д. в узлах модели с учётом термического расширения и ограничений степеней свободы.

Математическая формулировка решения задачи теплового анализа базируется на теоретических основах, приведенных в работах [70, 71, 72] и сводится к нижеизложенным основным положениям.

Температурное поле поперечного сечения колосника можно описать с помощью основного уравнения нестационарной теплопроводности. В случае решения двумерной задачи это уравнение будет иметь вид (решение по методу конечных элементов):

$$\frac{d}{dx}\left(\lambda_x \cdot \frac{dT}{dx}\right) + \frac{d}{dy} \cdot \left(\lambda_y \cdot \frac{dT}{dy}\right) + Q = \rho \cdot C \cdot \frac{dT}{dt}, \qquad (11)$$

где Q – внутренний источник тепла, Дж;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м^2·^{o}С;

ρ – плотность металла, кг/м^3;

C – теплоемкость металла, кДж/кг·^{o}С;

T – температура в текущей точке, °С;

t - время, с.

Для того чтобы решить уравнение, необходимо перейти в матричную форму:

$$[C]\frac{d\{T\}}{dt}+[K]\cdot\{T\}=\{F\}, \tag{12}$$

где $[C]$ - глобальная матрица демпфирования;

$[K]$ - глобальная матрица теплопроводности;

$\{F\}$ - глобальный вектор нагрузки;

$\{T\}$- вектор неизвестных температур.

Элементы $[C],[K]$ и $\{F\}$ заданы нижеописанными формулами.

$$\left[C^{(e)}\right]=\int_W c\rho[N]^T\cdot[N]dW, \tag{13}$$

где $[N]$ - матрица элементов формы.

$^{(e)}$ - индекс, обозначающий произвольный элемент

Матрица теплопроводности:

$$\left[K^{(e)}\right]=\int_W[B]^T\cdot[D]\cdot[B]dW+\int_S\alpha[N]^T\cdot[N]dS, \tag{14}$$

где $[B]$ - матрица градиентов;

$[D]$- матрица свойств материала.

$$\left\{F^{(e)}\right\}=\int_W Q[N]^T dW+\int_S q[N]^T dS+\int_S \alpha T_{oc}[N]^T dS, \tag{15}$$

где α - коэффициент теплопроводности;

T_{oc} - температура окружающей среды.

Исходя из чего, вектор глобальной нагрузки слагается из тепла от внутренних источников, а также теплообмена, заданного конвекцией или тепловым потоком.

Выполнение прочностного расчета осуществляется решением физически нелинейной задачи с использованием метода конечных элементов [71, 72].

Система уравнений:

$$[K(\{U\})]\cdot\{U\}=\{F\}, \tag{16}$$

где $\{U\}$ - вектор перемещений.

Компоненты перемещений:

$$[N]\cdot\{V\}=\{U\}, \tag{17}$$

С учетом соотношения между деформации и перемещениями получаем:

$$[B]\cdot\{V\}=\{\varepsilon\}, \tag{18}$$

где $[B]$- матрица градиентов, связывающая деформации и перемещения.

Преобразование исходного вариационного уравнения даёт возможность сформировать глобальную систему уравнений.

Вариация вектора перемещений:

$$\delta u = N_f^e \cdot a_f^e \cdot \delta U\ , \tag{19}$$

где $\left[a_f^e\right]$- матрица связи между глобальным и элементарным векторами.

Вариация вектора деформаций:

$$\delta\varepsilon = B^e \cdot a_f^e \cdot \delta U\ , \tag{20}$$

Вариация потенциальной энергии деформации тела:

$$\begin{aligned}\delta\pi &= \int_V \sigma_V \delta\varepsilon_V dV = \int_V \delta\varepsilon^T \sigma dV = \sum_{e-1}^{N_e} \int_V \delta\varepsilon^T \sigma dV = \\ &= \delta U^T \sum_{e-1}^{N_e} a_f^{(e)^T} \int_V B^{(e)^T} D^e B^e dV a_f^{(e)} U = \delta U^T K U,\end{aligned} \tag{21}$$

Элементарная матрица жесткости:

$$\left[K^{(e)}\right] = \int_V \left[B^{(e)}\right]^T \cdot \left[D^{(e)}\right] \cdot \left[B^{(e)}\right]^T dV\ , \tag{22}$$

Глобальная матрица жесткости:

$$K = \sum_{e-1}^{N_e} a_f^{(e)^T} k^e a_f^e, \tag{23}$$

Система уравнений глобального вектора нагрузки (элементарная работа поверхностных и внешних объёмных сил)**:**

$$\delta A = \sum_{e-1}^{N_e} \int_V \delta u^T f_V dV + \int_S \delta u^T f_S dS + \int_T \delta u^T f_T dT =$$
$$= \delta U^T \sum_{e-1}^{N_e} a_f^{(e)^T} (\int_V N_f^{(e)^T} f_V dV + \int_S N_f^{(e)^T} f_S dS + \int_T N_f^{(e)^T} f_T dT) = \quad (24)$$
$$= \delta U^T (F_V + F_S + F_T),$$

где $f_V^e = \int_V N_f^{(e)^T} f_V dV$ - элементарный вектор объёмных сил, возникающих в узлах;

$f_S^e = \int_S N_f^{(e)^T} f_S dS$ - элементарный вектор поверхностных сил, возникающих в узлах;

$f_T^e = \int_T N_f^{(e)^T} f_T dT$ - элементарный вектор нагрузок, возникающих в узлах от теплового расширения;

$F_V = \sum_{e-1}^{N_e} a_f^{(e)^T} f_V^e$ - глобальный вектор объёмных сил, возникающих в узлах;

$F_S = \sum_{e-1}^{N_e} a_f^{(e)^T} f_S^e$ - глобальный вектор объёмных поверхностных сил, возникающих в узлах;

$F_T = \sum_{e-1}^{N_e} a_f^{(e)^T} f_T^e$ - глобальный вектор нагрузок, возникающих в узлах от теплового расширения.

Учитывая основную особенность принципа возможных перемещений, согласно которой вариация потенциальной энергии деформации тела равняется виртуальной работе внешних сил:

$$\delta A = \delta \pi, \quad (25)$$

Появляется возможность получить матричное уравнение, учитывающее вариационную энергию деформации и элементарную работу:

$$\mathrm{KU} = F_V + F_S + F_T, \quad (26)$$

Вышеописанное выражение представляет собой основное разрешающее соотношение МКЭ и по сути, является системой линейных алгебраических уравнений описанных относительно узловых перемещений. При условии наложения корректных граничных условий, решение уравнения возможно при

помощи любого из известных численных методов теории решения систем с разложенными матрицами.

Глобальный вектор узловых перемещений:

$$\mathrm{U} = \mathrm{K}^{-1}(F_V + F_S + F_T), \tag{27}$$

Определив глобальный вектор узловых перемещений, становится возможным определение напряжений и деформаций в произвольных узлах элемента:

$$\varepsilon = B^e U^e = B^e a_f^e U = \varepsilon(x, y, z), \tag{28}$$

$$\sigma = D^e \varepsilon^e = D^e B^e a_f^e U = \sigma(x, y, z). \tag{29}$$

Для определения корректных граничных условий необходимо было обнаружить дефекты структуры деталей, которые во время эксплуатации колосников обжиговых тележек могли привести к дефектообразованию. Для этого необходимо было провести анализ колосников подверженных данным дефектам, такой анализ приведён ранее [78].

Граничные условия для колосников: t = 20-1250°C, скорость охлаждения 330 °C/мин [7]. Термоциклирование колосника приводит к образованию внутренних напряжений, что в последствии приводит к короблению и изломам [73÷77].

В результате анализа выводов исследования коробленых колосников, описанных ранее, можно выделить следующее: все коробленые колосники были подвержены усадочной пористости и имели большие усадочные раковины, размер раковин и их расположение во всех случаях были идентичны. Колосники не подверженные короблению имели значительно меньшие усадочные раковины, а также меньшую степень насыщения усадочными порами на тех же участках детали, либо не имели их вовсе. В результате анализа выводов исследования, описанного ранее, появилась необходимость в изучении влияния усадочных раковин на склонность колосников к короблению во время эксплуатации.

Необходимо заметить, что известны две причины появления внутренних напряжений в колосниках из стали 40Х24Н12СЛ при эксплуатации: градиент температур по сечению детали и перераспределение объёмов в структуре

колосника за счёт фазовых превращений (карбидообразования и фазового перехода α↔γ) [73÷77]. Учитывая тот факт, что фазовые превращения во всех колосниках при эксплуатации протекают с одинаковой интенсивностью, а дефектообразованию после 12 месяцев эксплуатации подвержены лишь 34,5% колосников, а также то, что при нормальных условиях эксплуатации колосники прибывают в зонах высоких температур малый временной промежуток (5-7 мин), что меньше времени, необходимого для протекания фазовых превращений, которые могли бы привести к появлению сильных внутренних напряжений [7, 73, 78], можно предположить, что фазовые превращения играют незначительную роль в образовании внутренних напряжений в колосниках обжиговых тележек при эксплуатаций.

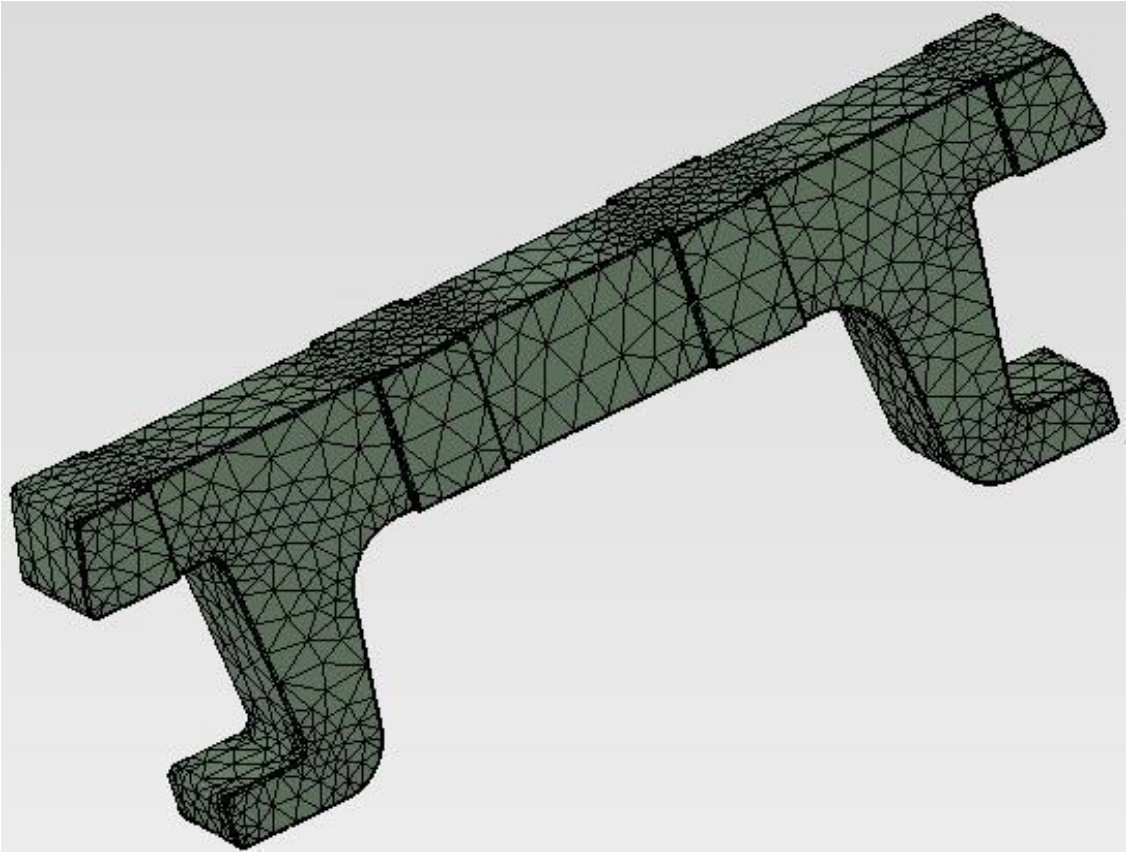


Рисунок 29.Конечно-элементная модель колосника обжиговой тележки

Исходя из вышеизложенного, анализ распределения температур, деформаций и интенсивностей напряжений, возникаемых при эксплуатации колосников,

выполнялся на двух моделях: в колосниках без усадочных раковин и с тремя усадочными раковинами (описание размеров и расположения принято в соответствии с реально обнаруженными усадочными раковинами, описанными ранее).

Таким образом, для моделирования температурного поля и напряженно-деформированного состояния колосников обжиговых тележек с применением метода конечных элементов были приняты следующие условия моделирования (методика):

- нагрузка на деталь: 15,140 кг (расчет максимальной высоты слоя),

- геометрические размеры (приложение 1),

- количество и распределение узлов поиска решений (распределение конечно-элементарной сетки) определено необходимостью получения большей точности в углах, перегибах и узких местах детали, а также возможность ЭВМ (рисунок 29).

- коэффициент температурного расширения $\alpha*10^6 = 18,4$ (1/Град),

- температура среды (под колосниками) – 600°С [8, 14, 15, 16, 17],

- 3-и усадочные раковины в матрице (расположение обусловлено фактическими данными),

- температура в зоне обжига (теплоносителя-верхнего слоя окатышей) – до 1250°С [8, 14, 15, 16, 17],

- время нахождения в зоне обжига – 5 мин [8, 14, 15, 16, 17],

- ограничения степеней свободы или условия монтажа колосника на ОТ, хорошо описано источнике [38],

- плотность стали $\rho = 7800$ кг/м^3 при температуре $t = 20$ °С,

- масса колосника 4,2 кг,

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 20$ [Вт/(м·град)] при $t = 600 \div 900$°С,

- теплоёмкость $c = 665$ [Дж/(кг·град)],

- модуль Юнга $E = 1,45 \cdot 10^{10}$ Н/мм^2,

- коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

3.2 Анализ температурного градиента, напряжений и деформаций, возникающих в литых колосниках в процессе эксплуатации

В результате моделирования условий эксплуатации колосников с применением метода конечных элементов получали распределение температур по сечению колосника, суммарные напряжения.

3.2.1 Распределение температур по сечению колосника

Модель распределения температур при прохождении зоны обжига показала, что между распределением температур в колосниках без усадочных раковин (рис. 30, а) и с тремя усадочными раковинами (рисунок 30, б) существуют несущественные различия, которые заключаются в небольшом изменении расположения и размеров изолиний теплового поля при наличии усадочных раковин. Необходимо отметить, что в обоих случаях не наблюдается существенных различий по глубине прогрева детали, что следует из анализа температурных шкал (рис. 30, а, б). В обоих случаях распределение температур идентично, из чего следует вывод, что наличие усадочных раковин не существенно влияет на температурный градиент колосников, образующийся при прохождении зоны обжига.

Широко известно [66, 79÷85], что процесс развития МКК развивается от 550°С, а интенсифицируется при 750-950 °С, при этом чем выше температура – тем интенсивнее идёт процесс карбидообразования и следовательно, МКК. Это означает, что во время эксплуатации, в верхней части колосника, обращённой в сторону высоких температур, при прохождении последним зоны обжига создаются температурные условия для интенсивного протекания процесса выделения карбидов. При склонности стали к МКК или некондиционной литой структуре, это приведёт к быстрому выходу из строя детали по механизму межкристаллитной коррозии, что доказывает выводы полученные практическим путём ранее.

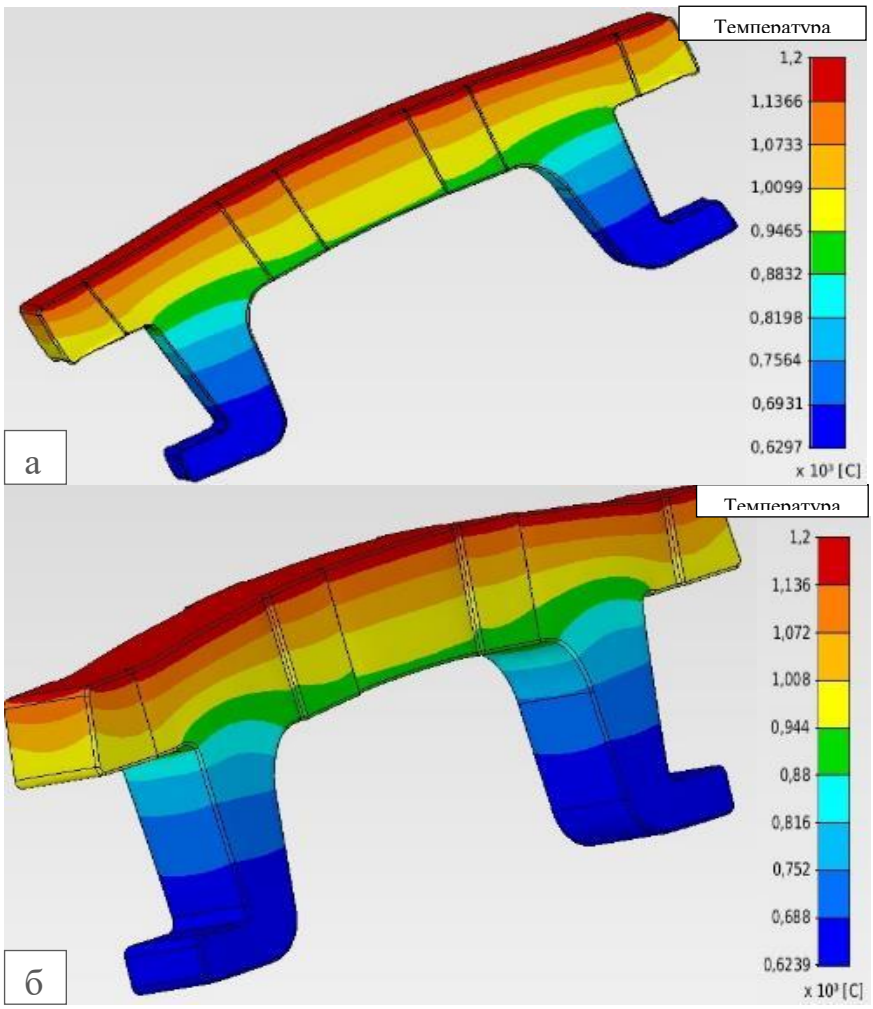


Рисунок 30.Моделирование распределения температур после прохождения зоны обжига по сечению колосника

Обозначения: а – без усадочных раковин, б – с тремя усадочными раковинами

3.2.2 Распределение деформаций по сечению колосника

Модель распределения деформаций по факту прохождения колосником зоны обжига (рис. 31).

В колосниках без усадочных раковин (рис. 31, б) величина деформации увеличивается от периферии к центру детали и в пике составляет: от 2 до 2,26 мм (зона красного цвета). В колосниках, имеющих три усадочных раковины (рис. 31, в), деформации распределены таким же образом, но имеют большие значения: от 2,3 до 3,45 мм в пике (зоны светло-красного и красного цвета). В колосниках с усадочными раковинами зоны деформаций с величинами более 2 мм имеют

значительно больший объем, по сравнению с колосниками без усадочных раковин. Максимальные деформации в центре детали с усадочными раковинами увеличились на 52%, и составляют от 3,1 мм до 3,45 мм (рис. 32).

Модель деформаций центральной части колосника во время эксплуатации (рис. 32) показала, что зона максимальных деформаций в центральной части колосника с тремя усадочными раковинами обширнее в 4 раза, чем у колосника без усадочных раковин.

Полученная модель коробления колосников, имеющих усадочные раковины, при эксплуатации (рис. 31, в) имеет полное сходство с реальной картиной коробления детали (рис. 31, а), что подтверждает достоверность заданных условий моделирования и описывает механизм протекания коробления колосников. Таким образом, можно сделать вывод, что во время термоциклирования колосников, коробление происходит лишь при наличии усадочных раковин диаметром более 5 мм, т.к. резко возрастает уровень остаточных (пластических) деформаций. И соответственно, для исключения дефекта коробления, по причине которого выходит из строя 21,3% колосников, необходимо выполнить исследования в сторону изменения технологии выплавки и разливки стали 40Х24Н12СЛ, позволяющие полностью исключить наличие в колосниках усадочных раковин .с диаметром более 5 мм.

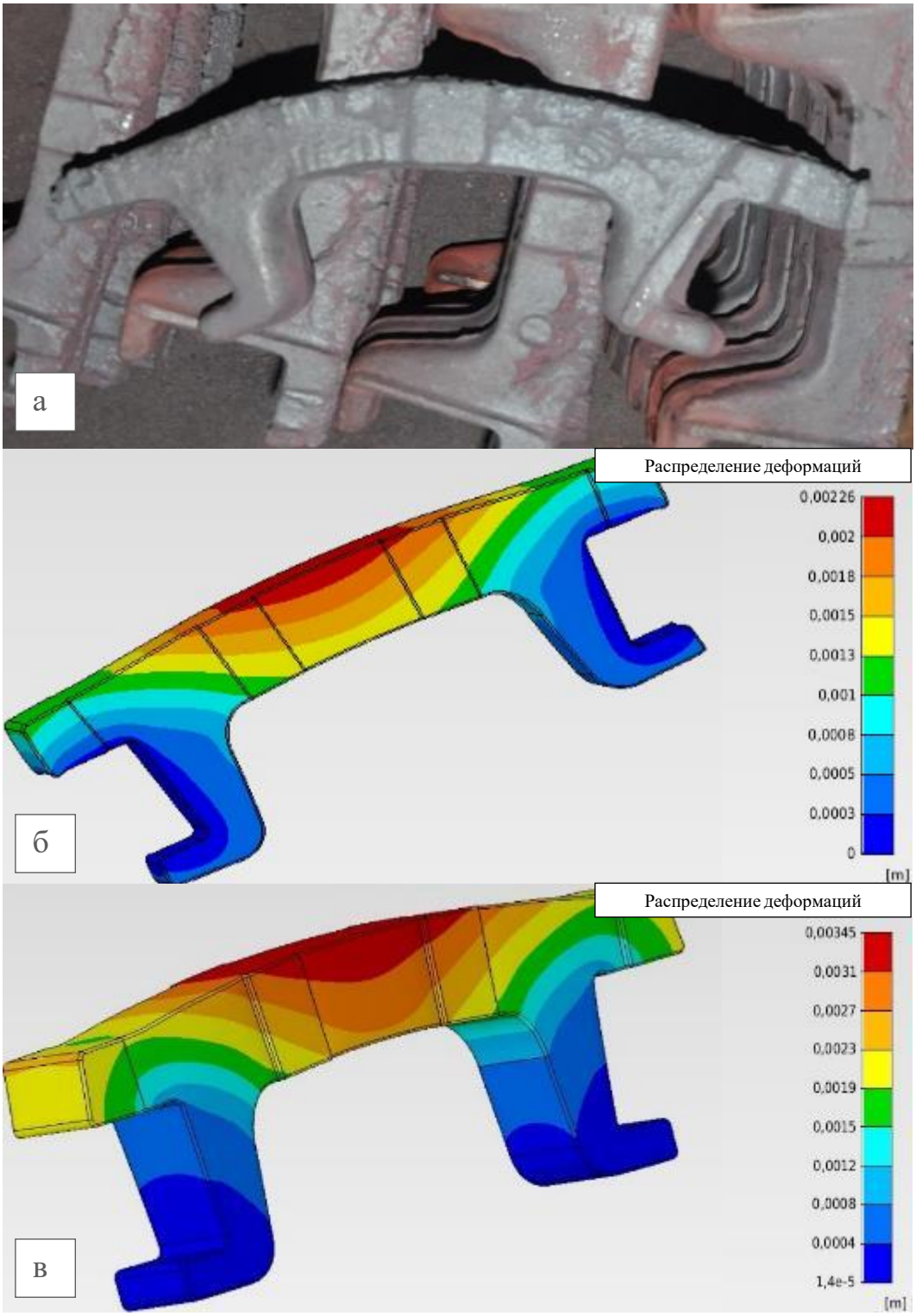


Рисунок 31.Модель коробления

Обозначения: а – фото колосников, 12 мес эксплуатации, б и в – модели распределение деформаций в деталях без усадочных раковин и с тремя усадочными раковинами соответственно (зона красного цвета на рисунке 31б соответствует зоне светло-красного цвета на рисунке 31в)

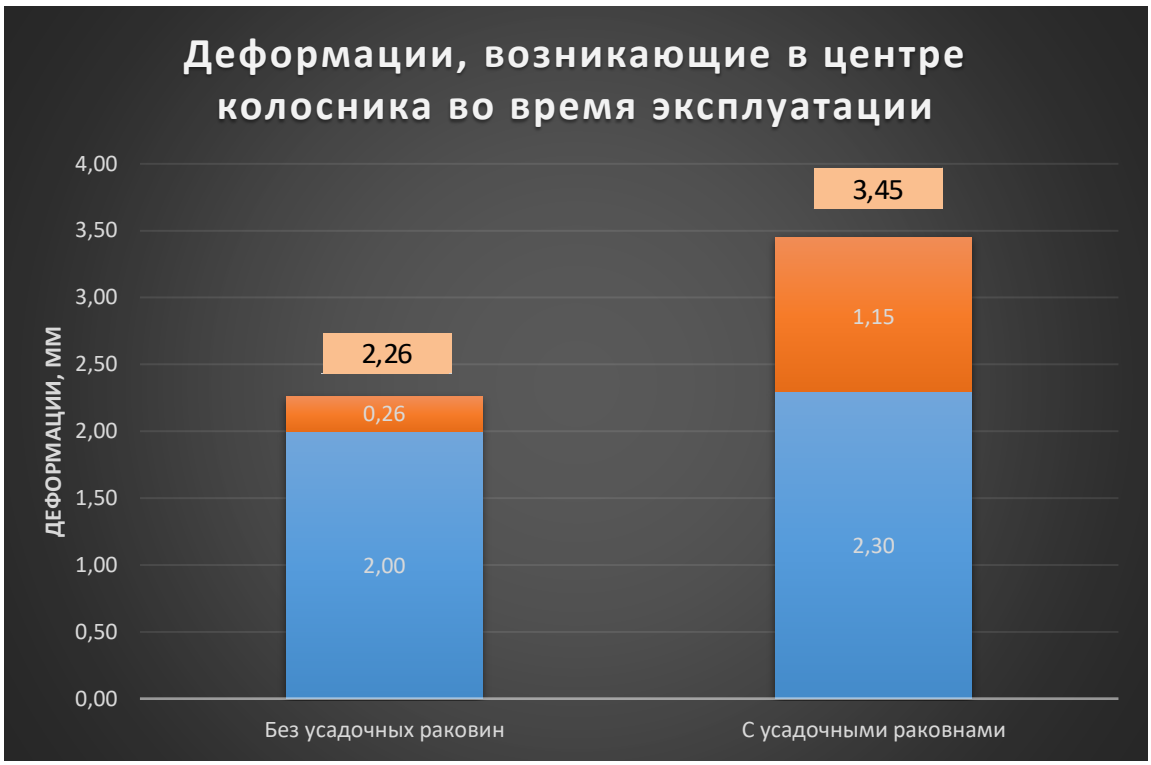


Рисунок 32.Диаграмма деформаций, возникающих в колосниках во время эксплуатации

Установлено, что протяжённость и размеры зоны пиковых деформации зависит от наличия усадочных раковин в теле колосников с критическим диаметром – 5 мм.

3.2.3 Распределение напряжений по сечению колосника

Были получены графические результаты моделирования напряжений (МПа) по сечению колосника с усадочными раковинами и без них (рис. 33).

Модель интенсивности напряжений без усадочных раковин (рис. 33, б) показала, что зоны максимальных напряжений расположены в замковой части. Напряжения составили 68,49-122,97 МПа, а в остальных частях 0,38-95,73 Мпа. Напряжения в замковой части выше на 28 %. Необходимо отметить, что данные участки детали являются ограничениями степени свободы колосника при эксплуатации, что определено условиями их монтажа. То, что в замковой части колосника находится зона, имеющая максимальные напряжения, что объясняет

наличие трещин и изломов в большинстве случаев, исходящих именно из этой зоны (рис. 33, а).

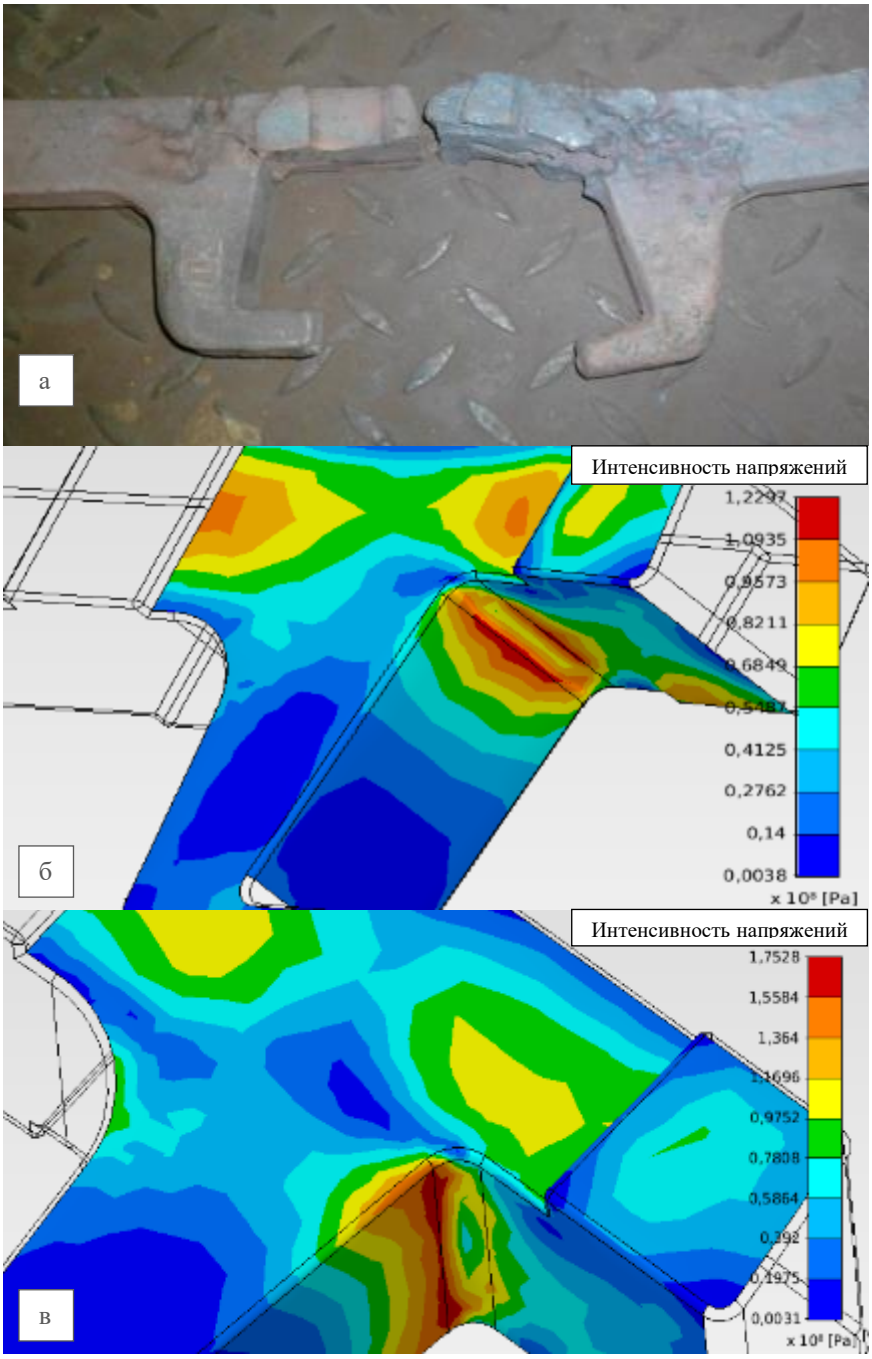


Рисунок 33.Моделирование механизм излома замковой части колосника

Обозначение: а – демонтированные с балок колосники после 12 месяцев эксплуатации, имеющие изломы замковых частей, б и в – интенсивность напряжений, возникающих при эксплуатации, по сечению колосников: не имеющих усадочных раковин и с тремя крупными усадочными раковинами соответственно

Модель интенсивности напряжений с усадочными раковинами (рис. 33, в) показала аналогичные результаты. Но интенсивность напряжений в пиках возросла на 42% и составляет 58,64-175,28 МПа, в остальных участках на 22% и составила 0,31-116,96 МПа.(рис. 34).

Полученная модель распределения напряжений, позволила объяснить описать механизм трещинообразования (приводящего к излому) в замковой части (изображенный на рис. 33, а), возникающий в 13,2% случаев выходов из строя. Установлено, что зона максимальных избыточных напряжений образуется в замковой части, что также совпадает с экспериментальными данными, полученными ранее [78]. Из-за наличия усадочных раковин и, как показано ранее, коробления в следствии наличия избыточных напряжений в детали, в замковой части колосника (в углу, по краям) образуются трещины, а разные деформационные напряжения на одну деталь ухудшают её эксплуатационные свойства. Дальнейшая эксплуатация такого колосника приводит к распространению трещины, и, в конечном итоге, излому замковой части детали.

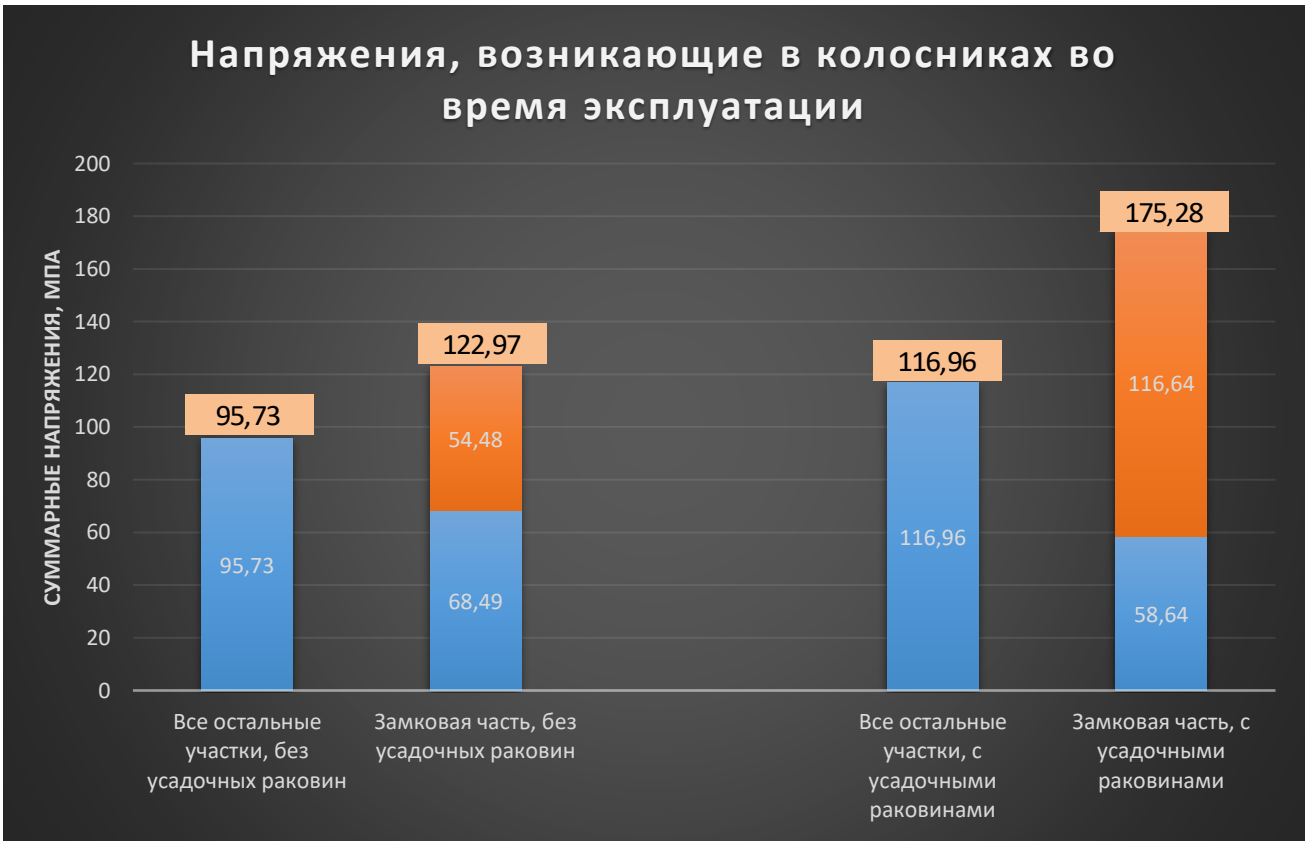


Рисунок 34.Напряжения, возжигаемые в колосниках во время эксплуатации

В колосниках, не имеющих в своей структуре усадочных раковин, напряжения на этих участках детали имеют значительно меньше значения. Можно предположить, что чем большие размеры и распространение имеют усадочные раковины в колосниках – тем выше внутренние напряжения при их эксплуатации. Вышеописанный механизм более точно описывает процесс протекания излома, и доказывает, что усадочные раковины увеличивают склонность колосников обжиговых тележек к трещинообразованию и предположительно являются первопричиной этих дефектов. Стоит отметить, что защемление колосникового ряда искривленными в процессе эксплуатации подколосниковыми балками является не единственной и не всегда основной причиной образования данного дефекта, как это предполагалось в исследовании [66].

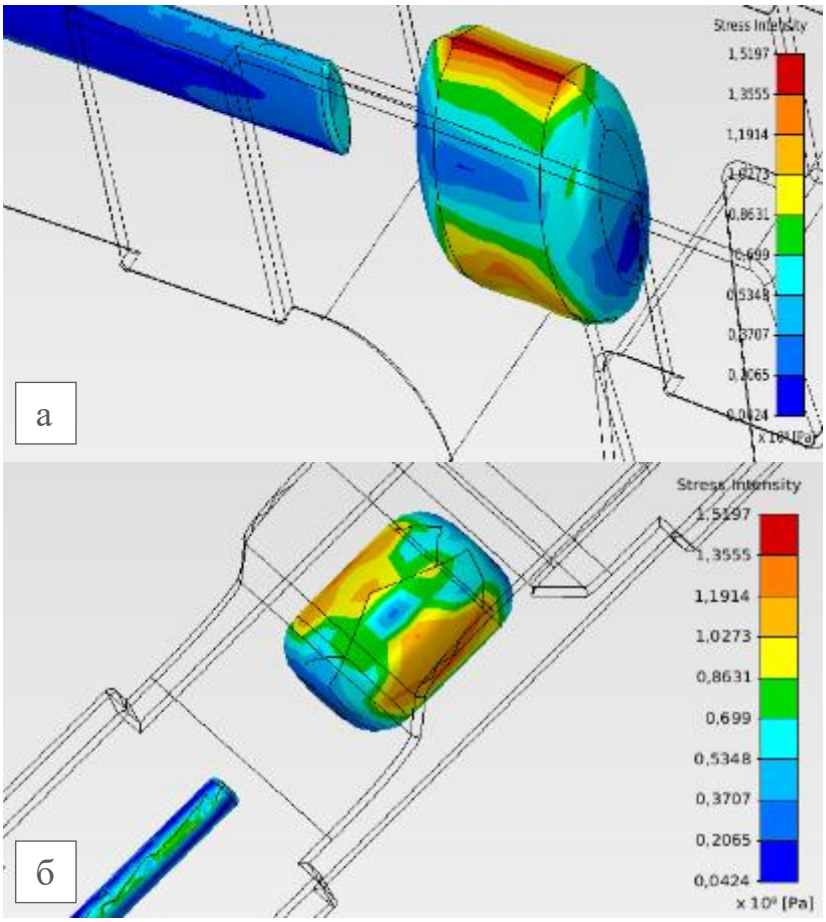


Рисунок 35.Моделирование интенсивности напряжений, возникающих при эксплуатации в матрице металла, расположенного у усадочных раковин

Обозначения: а – вид сбоку (включая верхнюю часть), б – вид снизу

Используя преимущества программного комплекса ANSYS можно выделить результаты отдельных элементов модели, скрыв при этом остальные, таки образом были получены данные распределения интенсивности напряжений возникающих в области металла, прилегающего к усадочным раковинам при эксплуатации колосников. Внутри больших раковин округлой формы, расположенных в замковых частях колосника, имеется три зоны с интенсивностью напряжений резко выше, чем во всех остальных участках. Одна зона находится сверху усадочной раковины (рис. 35, а) и две зоны внизу раковины (рис. 35, б). Интенсивность напряжений в этих зонах составляет от 86,31 МПа до 151,97 МПа, при том, что в остальных участках она находится в пределах от 4,24 МПа до 86,31 МПа. Исходя из чего, следует, что на поверхности, образующей усадочную раковину существуют разноориентированные зоны с интенсивностью напряжений выше на 76 %, чем в остальных участках металла прилегающего к усадочным раковинам.

Полученная модель распределения интенсивности напряжений показывает, что причиной образования продольных трещин колосников обжиговых тележек при эксплуатации (фактически, трещины обнаруженные при эксплуатации изображены на рис. 17) является наличие в последних усадочных раковин. Помимо этого, как показано ранее, колосники обжиговых тележек охлаждаются с большой скоростью. Исходя из исследований [25] можно сделать вывод, что на расположение трещин в колосниках также влияет скорость охлаждения детали в процессе эксплуатации. Роль скорости охлаждения проявляется в том, что трещины возникают преимущественно в тех частях отливок, которые охлаждаются быстрее других из-за особенностей конструкции отливки. Отмечено, что средняя температура трещинообразования при высоких скоростях охлаждения 600÷400ºС. Таким образом, средняя часть колосника охлаждается быстрее чем замковая по двум причинам: во-первых, замковая часть массивнее, во-вторых, просос газа охладителя идёт через щели для прососа газа, которые расположены в средней части колосника.

Что также объясняет протекание трещинообразования по принципу, отличному от описанного в литературе [58]: все исследователи сходятся в том, что макроориентировка трещины совпадает с направлением плоскости действия нормальных напряжений, а не с плоскостью касательных напряжений. Трещины должны иметь направление перпендикулярное к плоскости действия основных растягивающих напряжений при эксплуатации. В случае с колосниками, направление трещин совпадает с плоскостью основных растягивающих напряжений, что объясняется наличием зон с большой интенсивностью напряжений внутри усадочных раковин колосника.

Полученная модель интенсивности напряжений внутри тела колосников, имеющих усадочные раковины, при эксплуатации подтверждает достоверность заданных условий моделирования и описывает механизм трещинообразования с последующим изломом замковой части детали. Таким образом, можно сделать вывод, основной причиной трещинообразования и изломов (а также коробления, что доказано ранее) является наличие в теле детали усадочных раковин. Для исключения трещинообразования, по причине которого выходит из строя 13,2% колосников, необходимо выполнить исследования в сторону изменения технологии выплавки и разливки стали 40Х24Н12СЛ, позволяющие полностью исключить этот дефект в дальнейшем.

3.3 Выводы

После построения 3D-модели колосника во время эксплуатации были получены графические и количественные результаты, которые в полном объёме отразили и объяснили существующую картину дефектообразования, полученную в результате анализа подверженных короблению и трещинообразованию колосников, демонтированных после эксплуатации на обжиговой машине ОК-306. Все результаты математического моделирования с применением метода конченых элементов имеют точное совпадение с реальными данными, что указывает на верность подобранного метода моделирования и правильность заданных граничных условий и условий моделирования.

В результате проведённых исследований и моделирования с применением метода конечных элементов бывших в эксплуатации колосников обжиговых тележек получены следующие выводы:

- при эксплуатации колосников обжиговых тележек в них образуется сильный градиент температур, при этом верхняя зона колосника при эксплуатации прогревается до температур, достаточных для протекания процесса межкристаллитной коррозии,

- коробление колосников протекает идентично во всех случаях (изгиб в верх), что в большей степени определяется размерами и расположением усадочных раковин,

- описан механизм протекания коробления колосников обжиговых тележек: дефект развивается из-за наличия избыточных деформационных напряжений внутри детали, которые возникают из-за наличия усадочных раковин, что усугубляется режимом эксплуатации колосников (циклический характер тепловой нагрузки), в результате чего, при каждом новом нагреве детали уровень пластических деформаций возрастает, что в последствии может сопровождаться трещинообразованием и изломом,

- описан механизм протекания разноориентированного трещинообразования и изломов колосников: протекание процесса обусловлено избыточными

напряжениями в различных участках детали, склонность к появлению дефектов также резко возрастает при наличии усадочных раковин,

- определено влияние наличия усадочных раковин заданных параметров на эксплуатационный ресурс колосников,

- установлено, что на процесс трещинообразования и излома колосников в замковой части большое влияние оказывает наличие и расположение усадочных раковин, при наличии трёх усадочных раковин склонность к трещиннобразованию резко возрастает.

Таким образом, для исключения появления при эксплуатации колосников обжиговых тележек таких дефектов, как: коробление, трещинообразование и изломы замковых частей, необходимо изменение технологии их выплавки и разливки в сторону устранения (минимизации) возможности появления усадочных раковин в структуре детали.

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ КОЛОСНИКОВ ОБЖИГОВЫХ ТЕЛЕЖЕК С ПОВЫШЕННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ РЕСУРСОМ

4.1 Корректировка химического состава литых колосников из стали 40Х24Н12СЛ

Как было установлено ранее, замена стали 40Х24Н12СЛ на аналог без существенного удорожания не принесёт существенного повышения эксплуатационного ресурса. Повышения эксплуатационного ресурса колосников можно достичь за счет оптимизации литой структуры детали путём приведения её в состояние низкой склонности к МКК. Выполнить это можно за счет доработки технологии литья и термообработки (ТО) колосников.

Удовлетворительными результаты ТО можно считать, если:

- карбидная фаза будет распределена по всей матрице металла равномернее и в благоприятной форме (с малой протяженностью границ),

- расстояние 15 мкм между крупными карбидными выделениями [53], что позволит исключить их коагулирование,

- воспроизводимость результатов – стабильность результатов ТО между разными партиями колосников.

Достигнуть воспроизводимости результатов ТО вне зависимости от марочного колебания химического состава стали 40Х24Н12СЛ возможно за счет ограничения содержаний карбидообразующих элементов: хрома и углерода.

Содержание хрома имеет достаточное для воспроизводимости результатов ТО ограничение внутри марочного диапазона 22-26% по ГОСТ 977-88: «Отливки стальные. Общие технические условия».

Содержание углерода ограничено лишь по верхнему уровню (≤ 0,4%). Ширина диапазона не позволит достичь одинаковых результатов ТО на разных марочных концентрациях «С».

Необходимо ввести нижний предел для концентрации «С» в стали 40Х24Н12СЛ не выходя за границы ГОСТ 977-88: 0,30÷0,40 %. Если учесть допустимый предел погрешности для углерода, предусмотренный в ГОСТ 977-88 (±0,02), диапазон составит 0,28÷0,42 %.

Выбранный диапазон концентрации «С» не противоречит практике – сегодня все поставщики стремятся поставлять колосники с максимально-возможной допустимой концентрацией. Это объясняется: меньшей себестоимостью и повышенными эксплуатационными свойствами аустенита. При предложенном содержании «С» количество феррита в матрице металла будет находится в диапазоне до 7 %, оценка выполнена на структурной диаграмме нержавеющих сталей [74], что соответствует замерам по данным авторов [53], где утверждается, что доля феррита в стали 40Х24Н12СЛ среднего химического состава не превышает 10,5% (таблица 8).

Увеличение концентрации «С» в металле при плавке значительно уменьшит активность хрома, что понизит его угар.

Также, необходимо заметить, по данным таблицы 3 (зарубежных аналогов стали 40Х24Н12СЛ), узкий диапазон содержания углерода (0,3÷0,5%) – одно из главных отличий зарубежных аналогов, пользующихся высоким спросом на отечественных предприятиях, из-за их высокого эксплуатационного ресурса (например, сталь марки 1.4837 (ФРГ) или G-X40CrNiSi25-12). Таким образом, ограничение содержания углерода, для воспроизводимости условий термообработки – мировая практика.

Дополнительно предлагается повысить содержание Si сверх марочного состава 40Х24Н12СЛ до 0,5-2,0% (с 0,5-1,5%). Такое решение позволит в большей степени оптимизировать технико-экономические показатели технологии процесса выплавки стали 40Х24Н12СЛ – снизить угар дорогостоящих элементов (снизить себестоимость). Расчёт активности хрома необходимо выполнить при разных концентрациях кремния.

Необходимо заметить, исходя из данных таблицы 3, проанализированных ранее, решение по расширению диапазона содержание Si до 0,5-2,0 применено в идентичных 40Х24Н12СЛ и наиболее успешных марках сталей для колосников.

Для определения, как решения по оптимизации химического состава стали отразятся на себестоимости – предложено выполнить расчет параметров активности хрома в расплаве первого порядка при температуре 1500ºС с различными вариантами содержаний «С» и «Si». Выбор методики обоснован большими концентрациями элементов [86] (методика по мольным долям компонентов предположительно приведет к повышению погрешности расчётов).

Диапазон содержаний «С» и «Si» для расчетов: 0,1-0,2-0,3-0,4% и 0,5-1,0-1,5-2,0% соответственно см. таблицу 22.

Активность хрома по отношению к 1 %-ному стандартному состоянию [86]:

$$a_{Cr} = f_{Cr} \cdot [\%Cr], \tag{30}$$

Расчёт коэффициента активности хрома f_{Cr} в расплаве [86]:

$$\lg f_{Cr} = e_C \cdot [\%C] + e_{Cr} \cdot [\%Cr] + e_{Ni} \cdot [\%Ni] + e_{Si} \cdot [\%Si], \tag{31}$$

Зависимость параметров взаимодействия первого порядка от температуры имеет вид [87]:

$$e_{(T)} = [(2557/T) - 0{,}365] \cdot e_{(1873)}, \tag{32}$$

Параметры взаимодействия первого порядка для Т = 1873 К:

$e_C = -0{,}12$ [87]; $e_{Cr} = -0{,}0003$ [87]; $e_{Ni} = 0{,}0002$ [88]; $e_{Si} = -0{,}0043$ [87].

Параметры взаимодействия первого порядка для Т = 1773 К пересчитанные при помощи формулы (32):

$e_C = -0{,}12926$; $e_{Cr} = -0{,}00032$; $e_{Ni} = 0{,}00022$; $e_{Si} = -0{,}00463$.

Пример расчёта коэффициента активности хрома в стали 40Х24Н12СЛ при 1% кремния и различных содержаниях углерода (результаты расчетов см. в таблице 22):

1. При 0,4 % С:

$$\lg f_{Cr} = -0{,}12926 \cdot 0{,}4 - 0{,}00032 \cdot 24 + 0{,}00022 \cdot 12 - 0{,}00463 \cdot 1{,}0 = -0{,}12926 \cdot 0{,}4 - 0{,}00967 = -0{,}061374,$$

$$f_{Cr} = 0{,}86822,$$

$a_{Cr} = 0{,}86822 \cdot 24 = 20{,}83729.$

2. При 0,3 % C:

$\lg f_{Cr} = -0{,}12926 \cdot 0{,}3 - 0{,}00967 = -0{,}048448,$

$f_{Cr} = 0{,}89444,$

$a_{Cr} = 21{,}4666.$

3. При 0,2 % C:

$\lg f_{Cr} = -0{,}12926 \cdot 0{,}2 - 0{,}00967 = -0{,}035522,$

$f_{Cr} = 0{,}92146,$

$a_{Cr} = 22{,}1151.$

4. При 0,1 % C:

$\lg f_{Cr} = -0{,}12926 \cdot 0{,}1 - 0{,}00967 = -0{,}022596,$

$f_{Cr} = 0{,}94930,$

$a_{Cr} = 22{,}7832.$

Пример расчёта коэффициента активности хрома в стали 40Х24Н12СЛ при максимальном содержании углерода (0,4%) и различных содержаниях кремния (результаты расчетов см. в таблице 22):

1. При 2,0 % Si:

$\lg f_{Cr} = -0{,}05674 - 0{,}00926 = -0{,}06600,$

$f_{Cr} = 0{,}85901,$

$a_{Cr} = 20{,}61632.$

2. При 1,5 % Si:

$\lg f_{Cr} = -0{,}05674 - 0{,}00694 = -0{,}06386,$

$f_{Cr} = 0{,}86325,$

$a_{Cr} = 20{,}71816.$

3. При 1,0 % Si:

$\lg f_{Cr} = -0{,}05674 - 0{,}00463 = -0{,}06137,$

$f_{Cr} = 0{,}86822,$

$a_{Cr} = 20{,}83729.$

4. При 0,5 % Si:

$$\lg f_{Cr} = -0{,}12926 \cdot 0{,}4 - 0{,}00032 \cdot 24 + 0{,}00022 \cdot 12 - 0{,}00463 \cdot 0{,}5 = -0{,}05905,$$

$$f_{Cr} = 0{,}87287,$$

$$a_{Cr} = 0{,}87287 \cdot 24 = 20{,}9489.$$

Таблица 22. Параметры расчёта активности хрома в расплаве при температуре 1500ºС при различных концентрациях углерода и кремния

Расчёт коэффициента активности хрома $\lg f_{Cr}$ ***в расплаве***

lg f_{Cr}	0,5% Si	1,0% Si	1,5% Si	2,0% Si
0,1% C	-0,02028	-0,0226	-0,02491	-0,02723
0,2% C	-0,03321	-0,03552	-0,03784	-0,04015
0,3% C	-0,04613	-0,04845	-0,05076	-0,05308
0,4% C	-0,05906	-0,06137	-0,06369	-0,066

Коэффициент активности f_{Cr}

f_{Cr}	0,5% Si	1,0% Si	1,5% Si	2,0% Si
0,1% C	0,954	0,949	0,944	0,939
0,2% C	0,926	0,921	0,917	0,912
0,3% C	0,899	0,894	0,890	0,885
0,4% C	0,873	0,868	0,864	0,859

Активность хрома по отношению к 1 %-ному стандартному состоянию

a_{Cr}	0,5% Si	1,0% Si	1,5% Si	2,0% Si
0,1% C	22,905	22,783	22,662	22,542
0,2% C	22,233	22,115	21,998	21,881
0,3% C	21,581	21,467	21,352	21,239
0,4% C	20,948	20,837	20,726	20,616

На основании расчетов были построены зависимости влияния концентраций на активность и коэффициент активности Cr в расплаве (рис. 36 и 37). Из этих зависимостей следует вывод, что увеличение концентрации как «C» так и «Si» уменьшают угар Cr при плавке, а соответственно уменьшают себестоимость производства и улучшают технико-экономические параметры плавки.

Ограничение содержания углерода и увеличение диапазона содержания кремния, для воспроизводимости условий термообработки, приведет к снижению угара Cr.

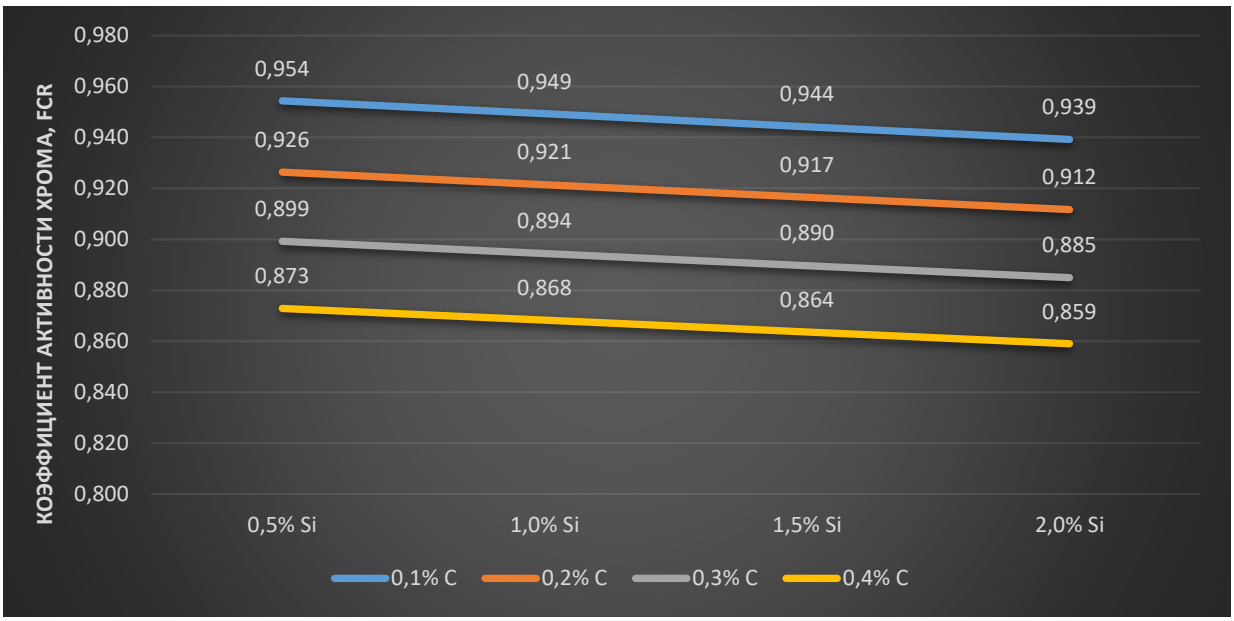


Рисунок 36.Коэффициент активности Cr в стали при t=1500ºC

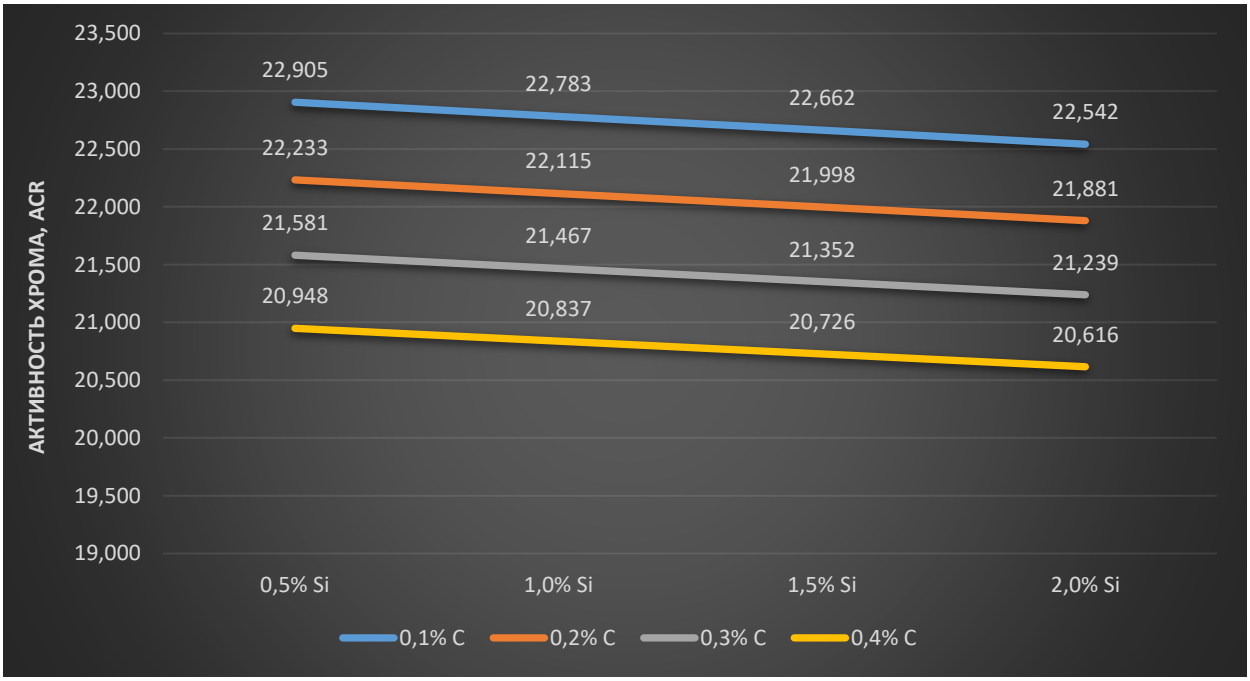


Рисунок 37. Активность Cr в стали при t=1500ºC

В дальнейшем предполагается, что данное улучшение носит рекомендательный характер для изготовителей колосников, позволяющее оптимизировать себестоимость изготовления без ухудшения качества детали. Помимо этого, теоретические выводы необходимо проверить практически (лучше - на производстве), данный вопрос в текущей работе далее не рассматривается.

4.2 Доработка режима термообработки колосников

Как установлено ранее [66, 78, 92], снижение эксплуатационного ресурса колосников связано с повышенным выходом их из строя, до истечения гарантированного срока службы (который составляет минимум 12 месяцев). Основной причиной, в 65,5% случаев [78], снижающей эксплуатационный ресурс колосников является межкристаллитная коррозия (МКК). Также было установлено, что в 30% остальных случаев выхода из строя литых колосников по другим причинам (наличие в них усадочных раковин), детали также были подвержены МКК.

ГОСТ 977-88 и СТП 26.260.484-2005 для колосников 40Х24Н12СЛ рекомендована ТО: закалка t = 1100°С, τ = 60 мин с охлаждением на воздухе, в воде или масле. ТО необходимо модернизировать ввиду не достаточности примененной закалки.

Увеличить стойкость против МКК предлагается за счет интенсификации контролируемого процесса выделения и роста карбидов на всю глубину матрицы металла, предполагается что это уменьшит интенсивность МКК при эксплуатации. ТО будет выполнена в два этапа:

1. Закалка – как установлено ранее, в структуре литой стали присутствуют крупные первичные карбиды хрома [106], выполнение закалки частично растворит их, оставив малые участки карбидов [105], а количество γ в структуре стали приблизится к максимальным значениям. Предположение о выделении карбидов по границам выполнено на основании общего закона о кристаллизации металла – энергия активации процесса на границе меньше, а центров кристаллизации больше [79]. Выделение карбидов в этих участках не потребует затрат энергии на образование зародыша, в связи с чем, предположительно, процесс роста остатков карбидной фазы разовьется активнее по границам фаз. Качество структуры после закалки должно соответствовать ранее определённым параметрам: расстояние между крупными карбидами ≥ 15 мкм [53], диаметр новых выделений ≤ 5 мкм, карбиды максимально приближена к форме глобулей.

2. Отпуск – после создания центров для развития процесса карбидообразования – необходимо дать этому процессу достаточное развитие на всю глубину матрицы металла. Качество структуры после отпуска должно соответствовать параметрам: обильное выпадение малых карбидов, крупные карбиды имеют форму глобулей.

Цель дальнейших изысканий: комплексная оценка карбидной фазы после каждого этапа технологии ТО и сравнение результатов. Для дальнейших исследований была выбрана следующая методика:

- из стали 40Х24Н12СЛ отлиты кубики 40х40х40 мм соответствующие по химическому составу, определенному на предыдущем этапе (рис. 38, а,б), которые были подвержены опытному режиму ТО по разным параметрам (описаны ниже),

- из б/у колосников после 3-х и 8-и мес эксплуатации подготовлены шлифы (рис. 38, в,г),

- все результаты металлографических изысканий приведены в сравнении структур, и выполнялись на описанном ранее комплексе оборудования THIXOMET PRO с микроскопом MEIJI TECHNO IM7200.

Металлографический анализ литых кубиков из стали 40Х24Н12СЛ показал наличие тонкой карбидной сетки по границам фаз толщиной до 2 мкм (рис. 38, а) и присутствие крупных первичных карбидов со средними размерами 25 мкм (рис. 38, б).

После стандартной закалки первичные карбиды уменьшились (рис. 38б), но матрица метала осталась пересыщена избыточным «С», а неоднородность распределения карбидной фазы имела ярко-выраженный характер. Также, (как ив матрице металла после литья) - отсутствуют малые карбиды внутри зерен (рис. 38, а,б).

В сравнении со структурой колосников, изготовленных по базовой технологии после 3-х мес эксплуатации заметно, что в них интенсивно протекает процесс карбидообразования с коагулированием карбидной фазы (рис. 38, в), что увеличивает склонность к МКК. Эти процессы объясняются низкой диффузионной подвижностью атомов хрома, большим размером первичного зерна, при условии

длительных выдержек при высоких эксплуатационных температурах, уже после 3-х месяцев структура колосника, изготовленного по базовой технологии имеет предпосылки к активному развитию МКК в дальнейшем.

После 8-и месяцев эксплуатации локально образуется карбидная сетка балл 6 (в диапазоне менее 500 мкм от верхней границы детали, рис. 38, г), процесс МКК уже хорошо различим при визуальном осмотре таких колосников. Карбидная фаза заметно увеличилась в размерах и объёмах, по сравнению с карбидами после 3-х мес эксплуатации.

Оптимальные параметры опытной ТО подбирались исходя из следующих соображений.

Закалка. Определение температуры. Цель закалки – частично растворить первичные карбиды. Этот процесс развивается при следующих параметрах: 723°С для $(CrFe)_7C_3$ и 1100°С для $(CrFe)_{23}C_6$ [62], минимальная температура под закалку – 1100°С.

Растворимость «С» в γ выше, чем в α. Соответственно, если произойдет фазовый переход γ→α – высвободившийся «С» перейдет в карбиды хрома. Очевидно нужно избегать перехода феррита в аустенит для уменьшения склонности структуры стали к МКК. Но при оценке структуры по диаграмме псевдобинарных сечений тройной системы Fe-Cr-Ni (Fe = 60%) установлено, что при t = 1100°С структура стали пройдет крит-линию γ-сольвус и структура будет находится в двухфазной области (α+γ). А в интервале 1100÷1200°С количество α будет максимальным. Соответственно, нагревать сталь выше 1100°С не целесообразно.

Температура закалки по ГОСТ 977-88 оптимальна.

Закалка. Время выдержки. Длительность выдержки не регламентирована ГОСТ 977-88. Источники [89] и СТП 26.260.484-2005 предлагают определять выдержку в зависимости от времени протекания диффузионных процессов, но методика определения выдержки по толщине изделия неприемлема.

Для стали 40Х24Н12СЛ выдержка под закалку определяется исходя из содержания карбидообразующих элементов: $70 \leq \tau \leq 90$ мин (60 мин – стандарт).

Таким образом, для дальнейших испытаний были подобраны следующие параметры закалки: температура выдержки для закалки 1100°С, время выдержки с шагом 10 мин от стандартного (60 мин), т.е. в диапазоне от 70 до 90 мин.

Для подбора время выдержки три литых кубика размерами 40х40х40 (как описано ранее), из стали 40Х24Н12СЛ с ограничением по содержанию углерода 0,30-0,40% и кремния 0,5-2,0%, выдерживались на протяжении 70, 80 и 90 минут на воздухе (исходя из недостаточности выдержки при 60-и мин, с шагом в 10 мин).

При τ = 70 мин существенных отличией от стандартной ТО на наблюдалось (рис. 38,б).

При τ = 80/90 мин результаты идентичны: крупные карбиды измельчились в структуре, оставив остатки (шириной ~5 мкм), а расстояния между остатками составляли 2-5 мкм (рис. 38д). Исходя из экономической целесообразности операции – оптимальное время выдержки под закалку – 80 мин (рис. 39).

После выполненной закалки количество избыточного «С» в структуре стали возросло, что теоретически повышает склонность к МКК [95] в зонах перегрева колосников у плоскости контакта с окатышем (что объясняется характером эксплуатации колосников).

Отпуск. Определение температуры. Для выделения избыточной карбидной фазы в благоприятной форме предлагается выполнить отпуск. Известно [62], при $t \geq A3$ (для 40Х24Н12СЛ это 850-880°С) - увеличивается диффузионная подвижность элементов. Но при $t < A3$ карбидообразование будет протекать крайне медленно [90]. При этом, при 600-900°С в стали может появится σ-фаза, влияние которой может оказаться негативным. Температура отпуска была определена в пределах 900÷910°С, что близко к эксплуатационным температурам [8, 14, 15, 16, 17].

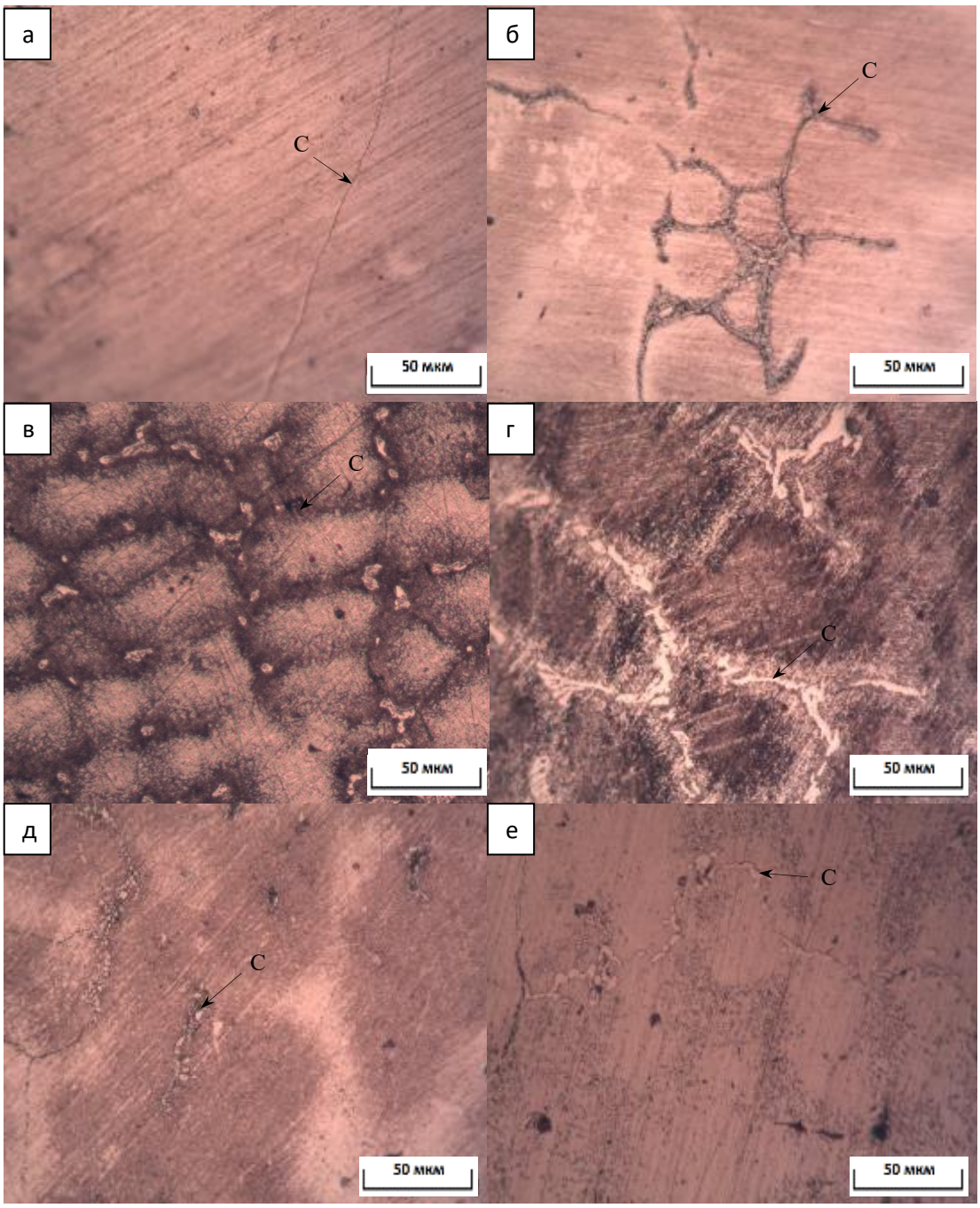


Рисунок 38.Структура колосника в 1.5 мм от плоскости контакта с окатышами *Обозначения: а – после литья, толщина карбидной фазы 1-2, б – после литья и стандартной закалки, эвтектоидный карбид (25 мкм), в – 3-и мес эксплуатации, г – 8-мь мес эксплуатации, МКК, д – после литья и опытной закалки, карбиды средних размеров (до 5 мкм), е – после литья и опытной ТО (закалка + отпуск)*

Отпуск. Время выдержки. Длительность отпуска теоретически установить не удалось, определялась экспериментально. Учитывая, что для диффузионных

процессов в твердом растворе необходимо большое время, начальная длительность установлена на уровне 100 мин с шагом в 50% от базиса (50 мин) при t = 900°С.

При τ = 100 мин предварительно закалённых кубиков произошло увеличение средних размеров остаточных карбидов с 5 до 8 мкм, но не наблюдалось появление мелких карбидов, хорошо различимых уже после 3-х месяцев эксплуатации.

При τ = 150 мин малые карбиды выделились на всю глубину структуры кубика и имели дематер до 1 мкм. Оставшиеся после закалки карбиды начали округляться и расти (диаметр ~ 10 мкм) (рис. 38е).

При τ = 200 мин карбидообразование продолжилось с минимальной скоростью. Но главная цель отпуска была достигнута при τ = 150 мин, исходя из экономических соображений это и есть оптимальное время выдержки под отпуск.

После отпуска τ = 150 мин и t = 900°С в матрице метала на всей глубине появлюсь большое количество мелких карбидов, которые будут служить центрами для дальнейшего процесса карбидообразования при эксплуатации колосников. При этом фазовый переход α↔γ будет наименее интенсивным в такой структуре, из-за отсутствия свободного углерода.

Лабораторными испытания доказано, что выполненная ТО увиличивает стойкость стали 40Х24Н12СЛ к МКК и фазовым переходам α↔γ, график термообработки см. на рис. 39.

Обзор на известные режимы ТО.

Ранее подробно описано, почему стандартная ТО по ГОСТ 977-88 и СТП 26.260.484-2005 не достаточна в современных эксплуатационных условиях колосников.

Анализ литературы показал, что закалка с высокотемпературным отпуском для стабилизации структуры и повышения стойкости против МКК широко не применялась. Отпуск стандартно применяется для достижения механических свойств (ГОСТ: 5949-61, 5582-75, 7350-77).

Известен стабилизирующий отжиг сталей хромоникелевого класса после сварки [91], проводимый для фазового перехода углерода из карбидов хрома в благоприятные карбиды ниобия и титана, а освободившийся Cr повышает

коррозионную стойкость (диапазон t = 850÷950°С). Разработанная для 40Х24Н12СЛ ТО преследует другие цели – переход избыточного углерода в карбиды хрома и железа на всей глубине матрицы металла.

Более схожий с разработанным режимом ТО [89]: для предварительно закалённой стали 12Х18Н10Т предусматривается стабилизирующий отпуск при t = 650°С, τ = 500 ч. За счет предложенной ТО достигаются схожие цели: в стали 12Х18Н10Т при эксплуатации (t = 500÷550°С – близко к эксплуатационным температурам колосников на ОМ) развивается карбидообразование $M_{23}C_6$ на базе $Cr_{23}C_6$ по границам фаз, а после отпуска – избыточная карбидная фаза имеет благоприятное распределение по всей глубине, увеличивает стойкость к МКК. Отличие и недостаток заключается в большой длительности предложенного отпуска и не подходящем для стали 40Х24Н12СЛ интервале температур.

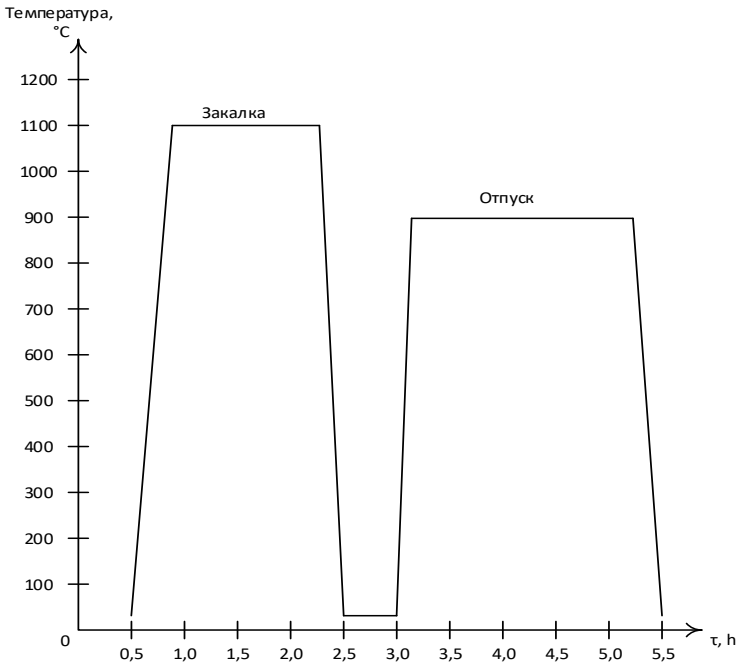


Рисунок 39.Опытный режим ТО для 40Х24Н12СЛ

В результате выполненных лабораторных исследований установлено, что подобранный режим термообработки стали 40Х24Н12СЛ с откорректированным химическим составом (закалка при 1100°С на протяжении 80 мин с последующим охлаждением на воздухе и отпуск при 900°С на протяжении 150 мин) обеспечивает высокую стойкость колосников против МКК.

4.3 Модернизация технологии разливки колосников из стали 40Х24Н12СЛ изготовителем (ноу-хау)

На ОАО «Череповецкий литейно-механический завод» были реализованы изменения в технологии изготовления колосников из стали 40Х24Н12СЛ, которые, в дополнение к описанной в главе 1 технологии, позволили достичь: высокого качества отливки (без усадочных раковин), требований оптимизированного опытного химсостава и необходимой структуры детали после опытной термообработки.

Выплавка стали. После расплавления компонентов плавки (как описано ранее, это: возвратный лом после обрезки литниково-питающей системы, лом Б28 и ферросплавы ФХ025, ФС45, ФМн80, Н-3) в индукционной наклонной печи ИСТ-2.0 (объёмом 2 т) зеркало металла защищается порошком перлитовым 0,63÷3мм и металл доводится до температуры разливки $t_{лик.ж.}$ = 1560±20°. Общая длительность плавки – 2 часа.

Требования по опытному химическому составу (таблица 23) позволяют применить более высокоуглеродистый лом Б28, в связи с упрощенными требованиями по содержанию углерода, а большее количество ферросилиция, в комплексе с повышенным средним содержанием углерода в стали – уменьшает угар дорогостоящих хрома и никеля (см. главу 4.1).

Таблица 23. Химический состав стали 40Х24Н12СЛ (железо – остальное)

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

Новые требования по химическому составу опытной стали 40Х24Н12СЛ позволяют оптимизировать технико-экономические параметры плавки за счет уменьшения угара дорогостоящих легирующих элементов (Cr и Ni) на величину от 1,5 до 9,9% (см. главу 4.1) в зависимости от концентраций углерода и кремния в

расплаве (максимальный эффект достигается при максимальных концентрация C и Si в новом рекомендованном диапазоне, см. табл. 23).

Формовка и разливка стали. По достижении температуры расплава в индукционной печи $t_{лик.ж.}$ = 1560°C начинается этап разливки стали. Перед разливкой стали рекомендуется выполнять продувку расплава инертными газами или вакуумирование.

Температура разливки установлена экспериментальным способом после проведения испытаний на производственной площадке «ЧЛМЗ». Так, экспериментально установлено, что при температуре разливки менее 1540°C при разливке металла высокий риск образования «спаев». При этом, при температуре разливки 1560±20°C не образуется дефектов литья, влияющих на эксплуатационный ресурс колосников, что дополнительно подтверждается промышленными испытаниями колосников, разлитых при этой температуре (см. главу 5).

Выпуск стали осуществляется в ковш ёмкость 250 кг, температура в ковше замеряется переносной термопарой, разливка стали в формы при температуре ниже 1540°C останавливается, металл возвращается в печь. Шлак в ковше так же наводится перлитом. Длительность нахождения металла в ковше менее 10 минут. Перед заливкой стали шлак в ковше снимается до чистого зеркала металла металлическими скребками.

Металл разливается в формы из ХТС (рис. 40). Разливка в стопку не допускается. Тип формовки является ноу-хау, применяемым при разливке опытной стали 40Х24Н12СЛ (как и температура разливки). Масса жидкого металла на форму составляет 56,2 кг, разливка в формы осуществляется непосредственно у печи для минимизации времени. Одновременно можно заливать не более 4 форм массой общей массой 224,8 кг, что связано с потерей температуры металла в ковше. При достижении температуры металла в печи менее 1560°C необходимо остановить разливку и довести температуру до требуемого минимального уровня в 1560°C. Перегревать сталь выше 1580°C запрещено.

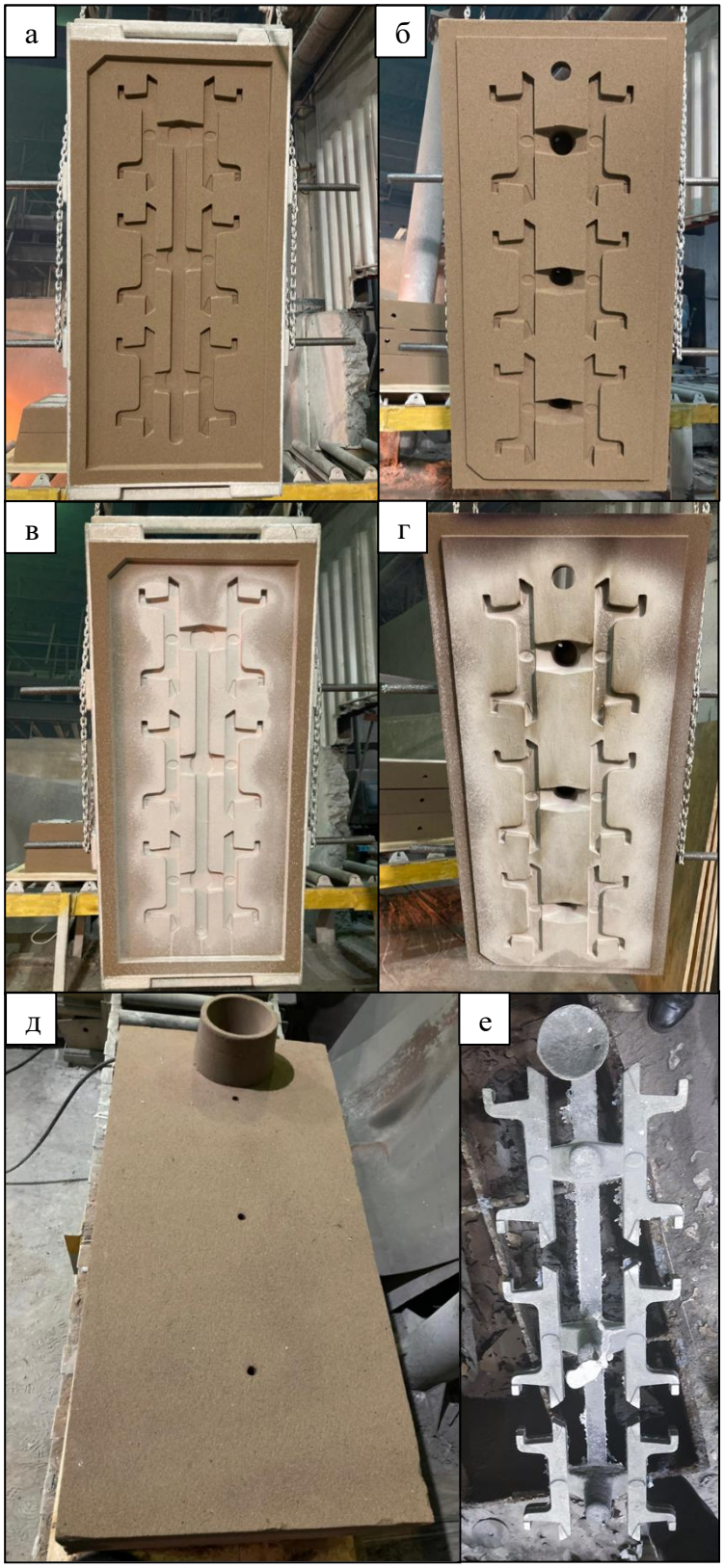


Рисунок 40. Формовка ХТС для отливки колосников из стали 40Х24Н12СЛ,

а, б – нижняя и верхняя полуформы из ХТС,

в, г – нижняя и верхняя полуформы после покраски противопригарной краской,

д – форма в сборе с установленной заливочной воронкой,

е – готовая отливка после извлечения из формы (до механической обработки).

Для формовки применяется холодно-твердеющая смесь, отвердителем в составе является фенолоформальдегидная смола. Формовка без опочная (с применением деревянной рамы) ввиду малых габаритов изделия. Катализатором отверждения является ортофосфорная кислота 70-80% -ной концентрации. Смеситель монтируется перед формовочным участком либо непосредственно в нём из-за низкой живучести смеси. После формовки смесь затвердевает 1 час, максимальная прочность достигается через 24 часа в помещении с комнатной температурой и влажностью менее 10% (рис. 40), соответственно рекомендуется производить заливку не менее чем через 24 часа.

Формы окрашивают противопригарной цирконовой огнеупорной краской (рис. 40,в,г) для достижения требуемого качества поверхности отливки и отсутствия поверхностных дефектов (что позволяет исключить дефекты поверхности (пригары и др.) ввиду повышенной температуры разливки). Собранная форма с установленной заливочной воронкой – рис. 40,д.

Ввиду массовости производства колосников модель для формовки изготавливается из модельного пластика (большая твердость, выше качество поверхности, большее количество съёмов). Перед формовкой на модель наносится разделительное покрытие для упрощения отделения модели от формы.

После остывания в форме отливка извлекается (рис. 40,е), механической обработкой удаляется литниково-питающая система со следующими требованиями:

1. класс точности 13-ый;
2. отклонения от плоскости и прямолинейности не более 0,64 мм;
3. допуск степени коробления по высоте - 0,40 мм, по длине - 1,20 мм;
4. допуск массы отливки не более 0,1 кг;
5. допуск смещения отливки 0,56 мм;
6. формовочные уклоны по ГОСТ 3212-92 [13] для песчано-глинистых смесей по ширине модели колосника: 0,6 мм, по высоте: 0,75 мм, по длине: 2,30 мм;
7. допуски размеров модельного комплекта колосника (класс точности модельного комплекта – 2) по ширине х высоте х длине, мм: 0,10 х 0,13 х 0,18;

8. местные поверхностные углубления или выступы с плавным переходом к основной поверхности не должны превышать 2 мм.

Термообработка. После механической обработки партия колосников помещается в промышленную муфельную печь большого объема предварительно нагретую под закалку (1100°С). После выдержки под закалку при 1100°С на протяжении 80 мин партия может быть, как извлечена из печи для охлаждения на воздухе, так и оставлена в печи для проведения отпуска при 900°С на протяжении 150 мин. После отпуска партия охлаждается на воздухе, допускается охлаждение вместе с печью.

Выводы. Завод изготовитель колосников ОАО «ЧЛМЗ» применил ноу-хау в технологии выплавки, формовки и разливки опытных колосников из стали 40Х24Н12СЛ:

- температура разливки $t_{лик.ж.}$ установлена на уровне 1560$\pm$20° при коэффициенте массы литниково-питающей системы k = 2.1, что составляет 56 кг;
- общая формовка 6-и колосников, отказ от формовки в стопку.

Применение описанной модификации привело к исключению возможности образования крупных усадочных раковин в колосниках (что доказано входным контролем экспериментальных колосников, полученных от «ЧЛМЗ», описанным в главе 5.2), а так-же к оптимизации технологии разливки колосников, что при условии соблюдения остальных её параметров (описанных в главах 1.6 и 1.7) позволило сохранить её основные эксплуатационные характеристики (жаростойкость, стойкость против МКК) на высоком конкурентом уровне, что подтверждено промышленными испытаниями (описанными в главе 5).

Примененное ноу-хау в части оптимизации температуры разливки и массы прибылей для колосников из стали 40Х24Н12СЛ и её модификаций принимается достаточным для исключения возможности образования литейных дефектов и соответственно, исключения брака по короблению и изломам, к которому приводят усадочные раковины (как описано в главе 3).

4.4 Выводы

Для исключения усадочных раковин в колосниках необходимо модернизировать технологию разливки – применить безопочную формовку ХТС на 6 деталей (для формовки более 6-и деталей необходимо применять опоки) при коэффициенте массы литниково-питающей системы k = 2.1, отказаться от формовки в стопку, установить температуру разливки (заливки стали в форму) на уровне 1560+20°, а для достижения требуемого качества поверхности колосников – окрашивать полуформы противопригарной цирконовой огнеупорной краской.

Для увеличения стойкости колосников против МКК после литья необходимо выполнять ТО: закалка t=1100°С, τ=80мин на воздухе и отпуску t=900°С, τ=150 мин. После закалки крупные карбиды частично растворяются, как и тонкая карбидная сетка. После высокотемпературного отпуска избыточная карбидная фаза благоприятно распределена на всю глубину детали, а дальнейшие структурные превращения замедляются.

Для воспроизводимости результатов ТО и оптимизации технико-экономических параметров плавки целесообразно скорректировать химический состав стали 40Х24Н12СЛ: ввести нижний предел содержания «С» (0,30%), повысить предел содержания Si (до 2,0%).

Лабораторными испытаниями доказано, что подобранный режим ТО замедляет карбидообразование, повышает сопротивление развитию МКК. В дальнейшем, необходимо провести промышленные испытания экспериментальной партии колосников в реальных условиях эксплуатации для апробации результатов, полученных лабораторным путём.

5. ПРОВЕДЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

5.1 Параметры проведения промышленных испытаний литых колосников

Для определения эффективности предложенных улучшений в технологии изготовления колосников из стали 40Х24Н12СЛ необходимо проведение промышленных испытаний для исключения любых «лабораторных» погрешностей эксперимента. Другими словами, необходимо изготовить партию по предложенной технологии на заводе в промышленных масштабах и установить эту партию на работающую промышленную обжиговую машину.

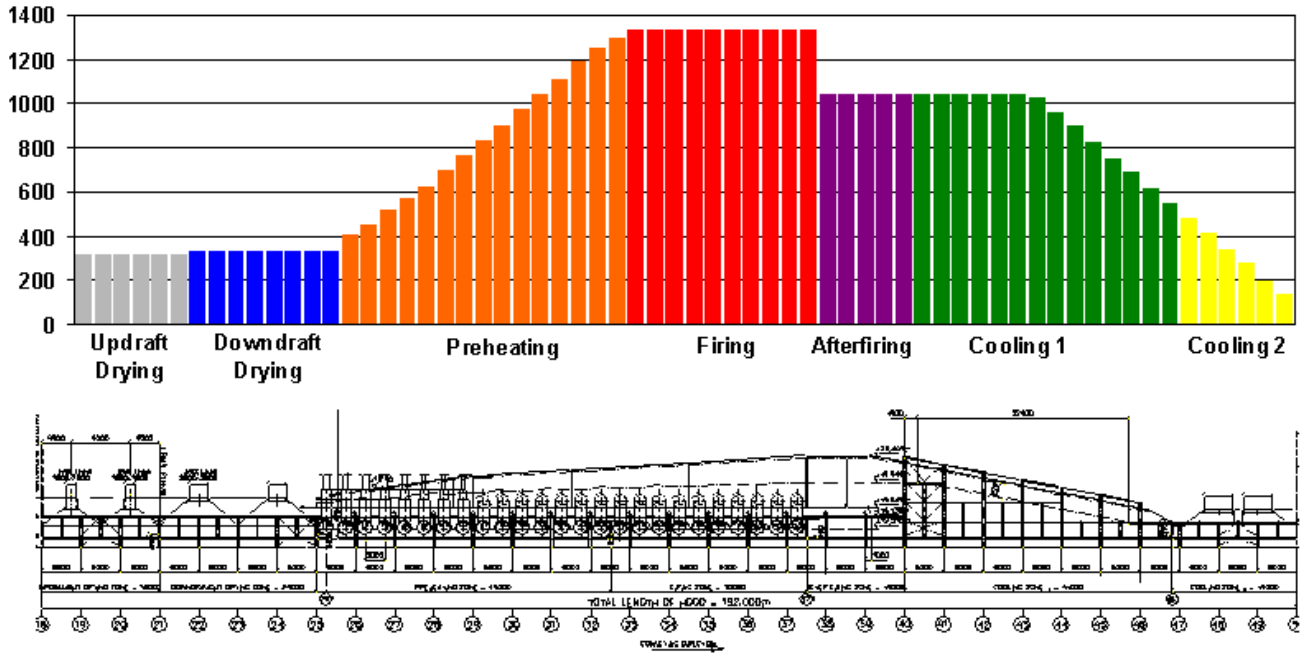


Рисунок 41.Температурный интервал эксплуатации обжиговой машины OUTOTEC (технологическая схема в приложении 3)

Таким образом, промышленные испытания колосников проводились на АО «Стойленском ГОКе» (АО «СГОК») на крупнейшей в Европе обжиговой машине OUTOTEC (LURGI) полезной (рабочей) площадью 768 м^2, построенной и запущенной в эксплуатацию в 2017 году, имеющей годовую производительность 7 млн. тонн. Температурный режим эксплуатации обжиговой машины составляет

20÷1310^{0}С (рис. 41). Исходя из этих данных – такой температурный режим эксплуатации обжиговой машины является стандартным, а следовательно – тепловой режим колосников обжиговых тележек можно считать типовым.

Таблица 24. Характеристика обжиговой машины OUTOTEC по зонам

Зона	Кол-во дутьевых камер в зоне, шт.	Длина зоны, м	Площадь зоны, м^2	Рабочая температура в зоне, ^{0}С
1	2	3	4	5
Сушка восходящим потоком	3,0	18,0	72	33
Сушка нисходящим потоком	3,0	18,0	72	350
Предварительный прогрев	7,5	45,0	180	430÷1250
Обжиг	5,5	33,0	132	1 260÷1 150
Рекуперация	2,0	12,0	48	1 150
Охлаждение 1	8,5	51,0	204	1 150÷500
Охлаждение 2	2,5	15,0	60	500÷100
Итого	32	192,0	768	

Из данных таблицы 24 можно сделать вывод: колосники пребывают в зоне высоких температур не более 7 минут (при нормальной работе обжиговой машины), во время кратковременных остановок (для замены обжиговых тележек на головном радиусе) время пребывания в зоне высоких температур увеличивается до максимально – 17-и минут (время рассчитано исходя из средней скорости движения колосникового поля 5,0÷6,0 м/мин). Необходимо заметить, что во время кратковременных остановок без отсечек газа происходит автоматическое снижение расхода газа на горелки (система АСУТП позволяет это сделать), таким образом, в высокотемпературных зонах снижаются температурные нагрузки на оборудование (обжиговые тележки, колосники, борта, защитные уплотнения, рельсы и другие металлоконструкции). Материалы по общему 3-D виду и технологической схеме обжиговой машины OUTOTEC АО «СГОК» представлены в приложениях 2 и 3 соответственно.

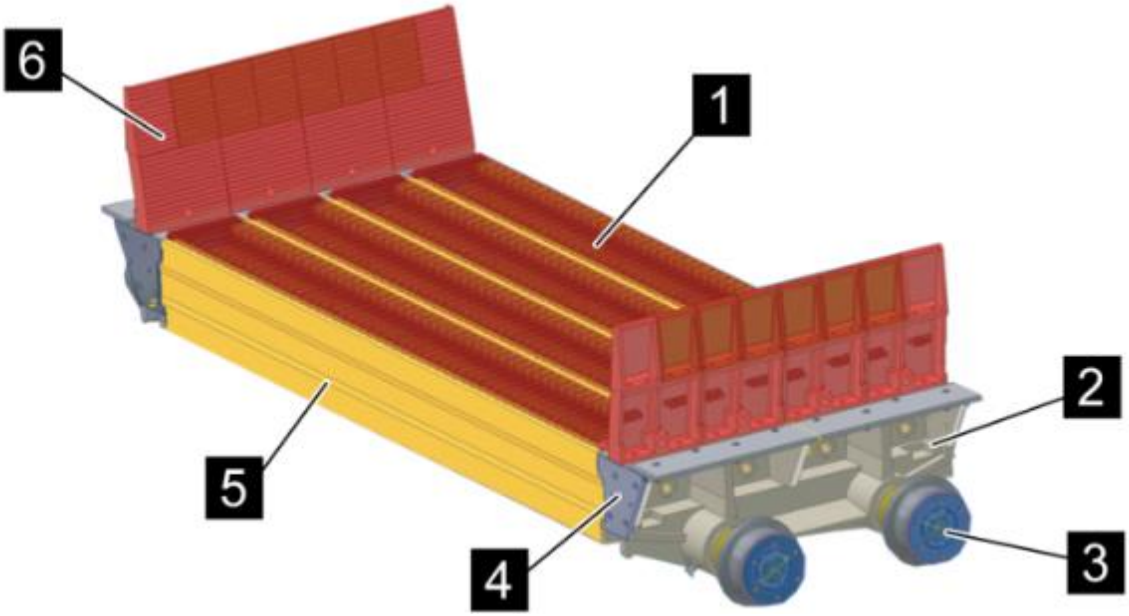


Рисунок 42.Обжиговая тележка с обжиговой машины OUTOTEC
(поузловой чертеж см. в приложении 10)

Колосниковая решетка	Концевая секция
Рабочие и прижимные колеса	Передняя пластина
Подколосниковая балка	Борт тележки

Исходя из конструктивных особенностей обжиговой машины OUTOTEC – на обжиговых тележках установлено по 396 колосников (рис. 42). Проектные данные и основные размеры обжиговых тележек указаны в таблице 25. На обжиговых тележках АО «СГОК» применяются колосники 3-х типов: рабочие, узкие закладные и широкие закладные (чертежи см. в приложении 9). Общий компоновочный (в том числе поузловой) чертёж обжиговой тележки см. в приложении 10. Во время проведения промышленных испытаний закладные колосники на обжиговой тележке не демонтировались и не заменялись. Это связано с отсутствием возможности выплавить такую модель на предприятии поставщике. Необходимо заметить, что влияния на точность и качество промышленных испытаний этот факт не оказал, так как в закладных колосниках отсутствуют полости для прососа газа, а их общее количество на тележке очень мало – 24 штуки в замковой части под «клинами» (ввиду того, что не было установлено связи – как закладные колосники могут внести погрешность в эксперимент). Таким образом,

для проведения промышленных испытаний необходимо было укомплектовать экспериментальными рабочими колосниками одну обжиговую тележку полностью (372 рабочих колосника).

Для выполнения промышленных испытаний на АО «СГОК» был составлен рабочий план испытаний (приложение 4) «РП №26-20.02-18 от 18.01.2018», в котором помимо того, что была описана методика испытаний и назначены ответственные за каждый этап, было также предусмотрено составление акта о качестве экспериментальных колосников каждый месяц с начала проведения промышленных испытаний. Все испытания опытной партии колосников осуществлялись в соответствии с этим планом, включающим в себя следующие основные этапы:

1. Подготовка к испытаниям (заключение договора, закупка и поставка);
2. Входной не разрушаемый выборочный контроль на соответствие документации: геометрических размеров, веса, качества поверхности и уклонов, отсутствия поверхностных литейных дефектов (пригаров, пор, усадочных и газовых раковин);
3. Входной разрушаемый контроль: макроанализ для поиска скрытых дефектов (усадочных раковин), микроанализ для определения качества структуры детали после экспериментальной термообработки, анализ химического состава стали на предмет соответствия его корректировке;
4. Монтаж экспериментальных колосников на обжиговую тележку и установка этой тележки на обжиговую машину;
5. Ежемесячный контроль экспериментальной партии на протяжении всего срока испытаний, который составляет не менее 24 мес.;
6. По факту завершения испытаний: макроанализ для поиска видимых дефектов (коробление, МКК) и микроанализ для определения качества структуры по истечении заданного срока эксплуатации;
7. Принятие решения об успешности испытаний руководством предприятия (АО «СГОК») на Техническом Совете СГОК.

Таблица 25. Проектные данные и основные размеры обжиговых тележек

Число паллет	282
Ширина	4 000 мм
Длина	1 500 мм
Высота слоя (окатышей и донного слоя в сумме)	80÷420 мм
Высота слоя донной постели	80÷100 мм
Вес обжиговой тележки	9663 кг
Число колосниковых решеток на тележку	396

В последствии, опытная партия колосников объёмов 400 шт. была изготовлена на ОАО «Череповецкий литейно-механический завод» (ОАО «ЧЛМЗ») и поставлена на АО «СГОК» в первой половине 2019 года (спецификацию см. в приложении 5). Всего, по договору, в 2019 году на ОАО «ЧЛМЗ» было изготовлено по экспериментальной технологии (ТО с корректировкой химического состава) и поставлено и поставлены на АО «СГОК» 2500 колосников обжиговых тележек. В приложении 5 – спецификация на поставленную партию для промышленных испытаний (400 шт.), с указанием опытных параметров, а в приложении 6 – письмо-справка от ОАО «ЧЛМЗ», подтверждающее факт изготовления по экспериментальной партии по описанной ранее экспериментальной технологии, прошедшей лабораторные опробования, описанные ранее.

5.2 Входной контроль экспериментальной партии литых колосников перед началом промышленных испытаний

При поступлении экспериментальной партии колосников на АО «Стойленский ГОК» был выполнен её входной контроль в соответствии с Рабочим Планом проведения испытаний (приложение 4), который состоит из 2-х основных этапов:

1. **не разрушающий** контроль (замер веса и основных геометрических размеров),
2. **разрушающий** контроль (распил колосника для выполнения макроанализа для выявления дефектов технологии разливки (усадочных раковин), микроанализа для определения качества микроструктуры новых колосников после литья и ТО, и выполнение химического анализа стали).

Выбор образцов колосников опытной партии для входного **не разрушающего** контроля был выполнен методом случайного отбора 3-х. шт. колосников из разных ящиков с последующим замером их массы и геометрических размеров, а также осмотра качества поверхности (см. таблицу 26).

Качество поверхности было оценено экспертно. Так, на поверхности колосников отсутствовали видимые дефекты. Количество неровностей на поверхности колосников глубже 2 мм – не превышало 10-и шт. на 1-у деталь. Места от прибылей были обработаны вровень с основной поверхностью. Допуски размеров соответствовали ГОСТ 3212-92, точность отливки соответствует ГОСТ Р 53464-2009 (точность и отклонение размеров отливки, акт см. в приложении 7).

Таблица 26: Замеры массы и геометрических размеров рабочей части опытных колосников из стали 40Х24Н12СЛ (приложение 7)

№ п/п	№ детали	№ детали в партии	Вес, кг	Замеры ширины рабочей части колосника, мм			Замеры высоты рабочей части колосника, мм		
				Начала	Середины	Конца	Начала	Середины	Конца
1	47480	386	4,055	32,3	32,5	32,1	38,7	40,9	39,1
2	47455	378	4,075	32,4	32,6	32,3	38,6	41,0	38,3
3	47455	384	4,140	33,0	32,5	33,0	39,1	40,9	39,0

В результате выполнения входного не разрушающего контроля не было выявлено отклонений от требований нормативной документации и чертежей.

Входной **разрушаемый** контроль был выполнен на детали № 47480 (таблица 26), которая была распилена на 5-ть частей (рис. 43 и 44) для исключения возможности деформации поверхности среза и механического «ужатия» усадочных раковин (рис. 43). Разрушаемый контроль разделен на 3-и части:

- макроанализ для определения качества литейных параметров (температура разливки стали, достаточность и правильность расположения прибылей – рис. 43 и 44),
- анализ химического состава детали, что в первую очередь необходимо для определения параметра жаростойкости (соотношение содержаний хрома и никеля) и определения способности стали сопротивляться межкристаллитной коррозии (соотношение содержаний углерода и хрома – см. приложение 8),
- лабораторный микроанализ для определения качества параметров термообработки и литья (рис. 45).

Рисунок 43.Фото разрезанного на 5-ть частей колосника для макроанализа

Для выполнения **макроанализа** колосник был разрезан через участки наибольшего риска появления усадочных раковин: вдоль самых массивных частей детали и вдоль расположения литейных прибылей (исходя из опыта поиска усадочных раковин, описанного ранее).

Макроанализ разрезов показал, что в колоснике отсутствуют усадочные раковины (рис. 44), что свидетельствует о достаточном качестве параметров технологии разливки стали (отсутствие перегревов металла при разливке, достаточное количество прибылей и корректность их расположения).

Рисунок 44.Фото поверхностей разреза колосника под разными углами

Химический анализ был выполнен в Промышленной Лаборатории по контролю производства ДЦ-1 и ФЛЦ ПАО «НЛМК» г. Липецк (акт см. в приложении 8).

Результаты химического анализа показали, что химический состав детали соответствует требованиям ГОСТ 977-88 с незначительными отклонениями по

содержанию хрома (с учетом погрешности измерения и допуска по ГОСТ – этот показатель можно считать достигнутым).

Учитывая специальные требования Заказчика (ОАО «Стойленский ГОК»), изложенные в приложении 1 к договору поставки 00768 от 04.07.2018 – содержание углерода не должно быть ниже 0,28%, в стали – 0,23% (приложение 8), что соответствует ГОСТ 977-88. С учетом погрешности измерения данный параметр считается достигнутым. Таким образом, результаты химического анализа считаются удовлетворительными.

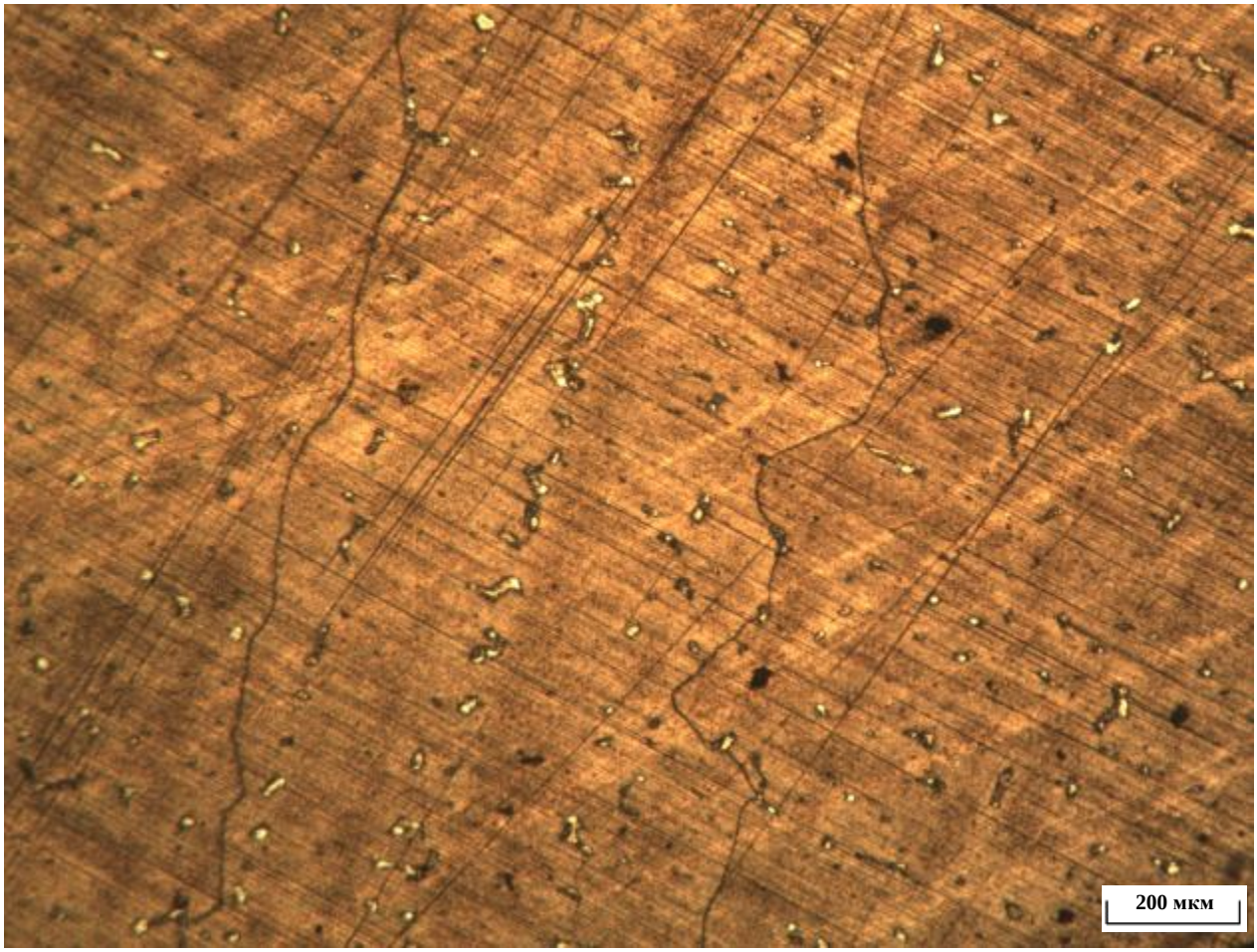


Рисунок 45.Микроструктура 3,0 мм от плоскости контакта детали с окатышами нового колосника поставки «ЧЛМЗ», увеличение х50

Благоприятно распределённые первичные карбиды глобулярной формы

Микроанализ для определения качества параметров термообработки и литья был выполнен в лаборатории на анализаторе изображений THIXOMETPRO.

Таким образом, из данных рис. 45 можно сделать вывод, об:

- отсутствии в структуре карбидной сетки,
- отсутствии крупных карбидов, расположенных на расстояниях менее 15 мкм друг от друга,
- отсутствии карбидов с размерами в сечении более 10 мкм (в диметре - для карбидной фазы, выделившейся в глобулярной форме),
- наличии мелких карбидных выделений глобулярной формы (диаметром менее 2 мкм) в междендритных участках, которые послужат центрами выделения карбидной фазы при эксплуатации,
- протёкшем процессе обильного выделения карбидной фазы на всю глубину металла, по всему сечению детали (по сравнению со структурой закаленной детали), что означает более «равновесное» состояние структуры колосника по всему сечению детали.

Результаты микроанализа (рис. 45) показали удовлетворительное качество структуры новых колосников, изготовленных по экспериментальной технологии: структура насыщена карбидами глобулярной формы малой протяжённостью границ и большим расстоянием между крупными выделениями карбидов (более 15 мкм) на всей глубине детали. Как описано ранее – такая структура выделения карбидной фазы исключает возможность протекания межкристаллитной коррозии и в меньшей степени обедняет матрицу металла хромом и углеродом у рабочей поверхности в следствие равномерного процесса выделения карбидов на всей глубине детали, а соответственно, можно предположить, в меньшей степени понижает жаростойкость.

По факту выполнения промышленных испытаний существует возможность и необходимость сравнить структуру и эксплуатационные характеристики (качество) экспериментальной партии с колосниками иностранного производства (поставки ф. «Outotec»), которые эксплуатировались на момент начала промышленных испытаний более 2-х лет без замечаний, но имели большую стоимость, в связи с чем, были приняты за эталон.

По результатам анализов (не разрушаемого контроля, анализа химического состава, макро- и микроанализа) установлено следующее:

1. Допуски веса и основных геометрических размеров соответствуют требованиям чертежей и нормативной документации.

2. В колосниках отсутствуют усадочные раковины (см. рис. 43, 44), что свидетельствует о достаточном качестве параметров технологии выплавки и разливки стали.

3. Результаты химического анализа показали соответствие требованиям откорректированного химического состава для воспроизводимости результатов термообработки.

4. Результаты микроанализа свидетельствуют о достаточности параметров опытной термообработки (закалка и отпуск) для достижения кондиционной структуры (максимально приближенной к состоянию «равновесия»).

В результате выполненного входного контроля сделан вывод, что экспериментальная партия колосников удовлетворяет всем требованиям и изготовлена в соответствии с требованиями и технологическими решениями, прошедшими лабораторные испытания, описанные ранее.

Таким образом, опытная партия колосников производства ОАО «ЧЛМЗ» была смонтирована на обжиговую тележку (ОТ) №175 и установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «СГОК» от 15.10.2018 г. (акт монтажа см. в приложении 11). Количество смонтированных колосников указано таблице 27.

Таблица 27. Параметры колосникового поля ОТ №174 АО «СГОК»

Общее количество колосников на ОТ	396 шт.
- рабочих колосников производства ОАО «ЧЛМЗ»	372 шт.
- закладных колосников производства OUTOTEC	24 шт.

5.3 Промышленные испытания

5.3.1 Результаты проведения промышленных испытаний опытной партии литых колосников на АО «Стойленский ГОК» по истечению первых 12-ти месяцев эксплуатации

В соответствии с планом проведения испытаний «РП №26-20.02-18 от 18.01.2018» (приложение 4), опытная партия колосников в количестве 372 штуки была смонтирована на обжиговую тележку и установлена на обжиговую машину 15.10.2018 года. Остальная часть партии (28 штук) была сохранена для ремонта колосникового поля во время проведения эксперимента.

Так-же в соответствии с РП (приложение 4) на протяжении первого года промышленных испытаний выполнялся ежемесячный контроль состояния колосникового поля с составлением соответствующего акта (приложения 12 и 13), контрольные параметры: количество колосников вышедших в брак, количество колосников подверженных дефектообразованию и по необходимости, другие параметры (установление причин дефектообразования). Так-же выполнялась фото-фиксация состояния внешнего вида экспериментальной партии колосников на протяжении всего срока эксплуатации (рис. 46).

Акты промежуточного контроля, составленные в промежутке 1÷11 месяцев промышленных испытаний представлены в приложении 12, акт контроля за состояние опытной партии колосников, составлений по факту истечения 12-и месяцев эксплуатации, представлен в приложении 13.

Стоит отметить, что через 6 месяцев после эксплуатации экспериментальная паллета была временно извлечена с ОМ для определения геометрических и весовых характеристик установленных колосников (данные анализа включены в промежуточный акт контроля состояния опытной партии колосников по истечении 9-и месяцев эксплуатации). В результате этого анализа установлено (приложение 12):

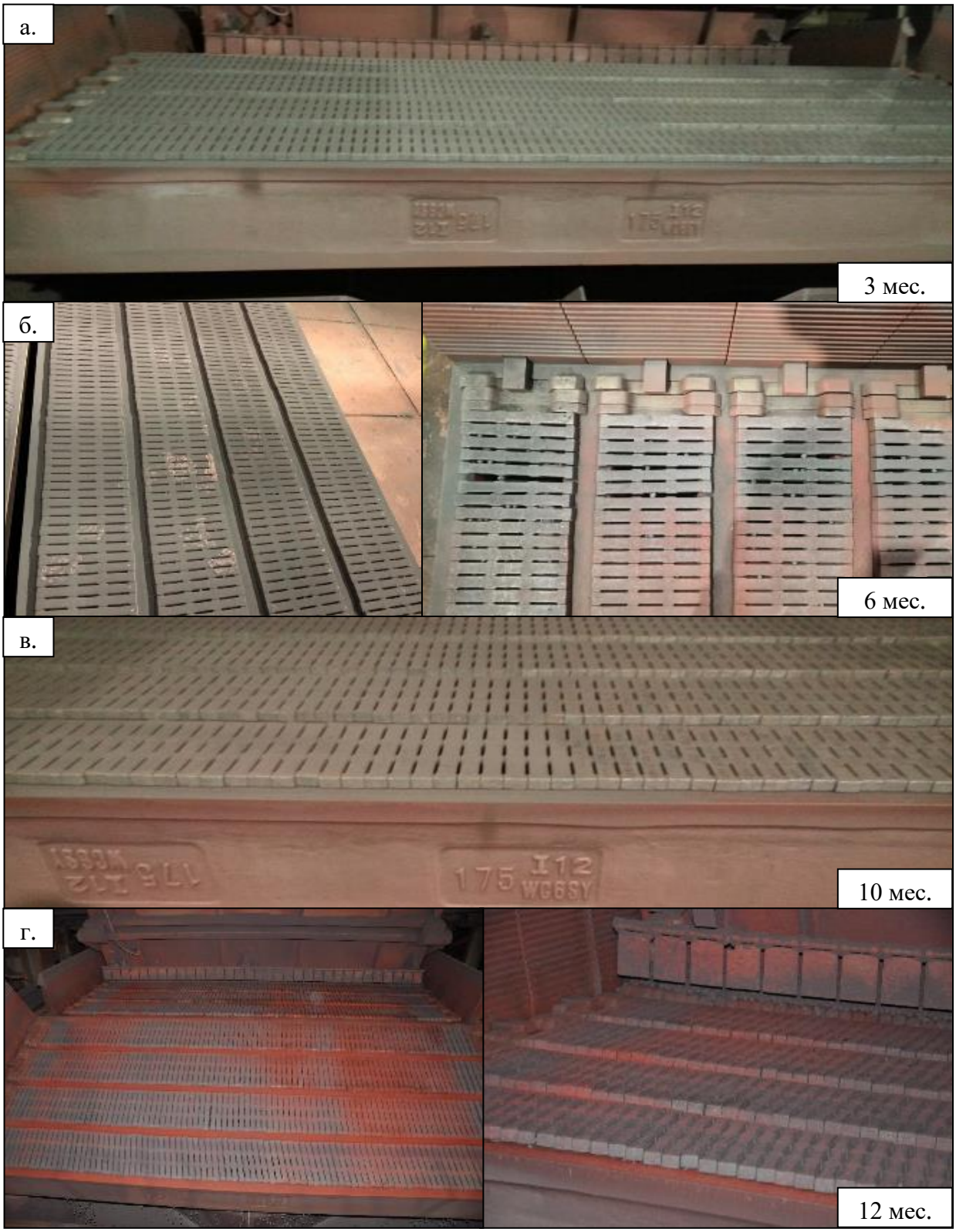


Рисунок 46.Фото обжиговой тележки №175 Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» во время проведения промышленных испытаний

Обозначения: а – после 3-х месяцев эксплуатации, б – после 6-и месяцев эксплуатации, в – после 10-и месяцев эксплуатации, г – после 12-и месяцев эксплуатации

- В колосниках отсутствуют любые видимые дефекты, разрушения и изменения геометрической формы (рис.46,б);
- При изучении демонтированного колосника (рис.47,а) – отсутствие видимых дефектов поверхности и любых изменений (предпосылок к образованию дефектов;
- В результате замеров веса и геометрии демонтированного колосника после 6 месяцев эксплуатации (рис. 47,а) не выявлено изменений за пределами погрешности в 1% от параметров новых колосников этой-же партии (до эксплуатации) – вывод получен при сопоставление данных таблиц 26 и 28, эти данные позволяют убедиться в удовлетворительной жаростойкости колосников и отсутствии их склонности к короблению.

Извлеченная с ОМ экспериментальная паллета была установлена назад в течение 10-и календарных дней, что будет учтено в дальнейшем анализе.

По истечении 12-и месяцев эксплуатации с экспериментальной ОТ вновь были извлечены колосники для определения жаростойкости экспериментальной партии колосников поставки «ЧЛМЗ». Так, были выполнены замеры веса до и после 12-и месяцев эксплуатации, которые были сравнены с аналогичными показателями колосников поставки ф. Outotec, принятых за эталон (таблица 29), акт представлен в приложении 12.

Таблица 28: Замеры массы и геометрических размеров рабочей части колосников из стали 40Х24Н12СЛ

№ п/п	№ детали	№ детали в партии	Вес, кг	Замеры ширины рабочей части колосника, мм			Замеры высоты рабочей части колосника, мм		
				Начала	Середины	Конца	Начала	Середины	Конца
1	47480	397	4,055	32,3	32,5	32,1	38,7	40,9	39,1
2	47455	378	4,075	32,4	32,6	32,3	38,6	41,0	38,3
3	47455	384	4,140	33,0	32,5	33,0	39,1	40,9	39,0
4	После 6 месяцев эксплуатации номера не различимы		4,143	33,7	33,3	33,2	39,6	40,6	39,1

Сравнение жаростойкости колосников от разных поставщиков после 12-и месяцев эксплуатации произведены по удельной норме, так как зависимость угара поверхности изделия от времени эксплуатации имеет линейную зависимость (скорость угара поверхности неизменна при условии равенства режима эксплуатации). Средняя удельная норма колосников Outotec за 3-и года эксплуатации составляет 3,89 кг./тыс.т., а колосников «ЧЛМЗ» за первый год эксплуатации – 2,99 кг./тыс.т., что на 23,13 % или на 0,9 кг/тыс.т. меньше, чем в среднем у колосников поставки ф. Outotec.

Таблица 29: Замеры массы колосников

№	Поставщик	Марка стали	Срок эксплуатации, мес.	Производительность ОМ, тыс.т.	Вес, кг	Угар, Δ от начала эксплуатации		Угар, Δ по отношению к прошлому году		Удельный расход, кг/тыс.т.
						кг	%	кг	%	
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
1	Outotec	1.4837 (GX40CrNiSi25-12)	0	-	4,050	-	-	-	-	-
2			12	6 000	3,857	0,193	4,77%	0,193	4,77%	**3,59**
3			24	6 800	3,653	0,419	10,35%	0,226	5,86%	**3,71**
4					3,585					
5					3,675					
6					3,648					
7					3,767					
8					3,549					
9					3,540					
10					3,631					
11			36	7 000	3,357	0,693	17,11%	0,274	7,55%	**4,37**
12	ЧЛМЗ	Экспериментальная технология 40Х24Н12СЛ (корр. по хим. составу: С – 0,3÷0,4 Si – 0,5÷2,0)	0	-	4,155	-	-	-	-	-
13					4,055					
14					4,075					
15					4,140					
16					4,143					
17					4,114					
18			12	7 000	4,100	0,188	4,56%	0,188	4,56%	**2,99**
19					3,860					
20					3,990					
21					3,665					
22					4,015					
23					3,926					

Исходя из расчета потребности ФОК АО «СГОК» в колосниках поставки «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии (приложение 12), потребность в колосниках поставки ф. Outotec больше на 23,13 % или на 7 805 шт.

суммарно в 2020÷2021 гг. Что говорит о повышенной жаростойкости колосников опытной партии, по сравнении с эталонными колосниками поставки Outotec. Учитывая идентичное содержания хрома и никеля в колосниках от обоих поставщиков причину повышенной жаростойкости необходимо искать в структуре детали.

Рисунок 47.Фото демонтированных с ОТ колосников

Обозначения: а – после 6-и месяцев эксплуатации, б – после 12-и месяцев эксплуатации

Сравнивая данные рисунка 21 с рисунками 46,47 хорошо заметна разница в качестве колосников (на рис. 20 изображено колосниковое поле после 6-и месяцев эксплуатации). Таким образом, по данным фото-отчета (рис. 46 и 47) можно сделать вывод об отсутствии видимых признаков протекания МКК в стали, для определения склонности к МКК в опытной партии колосников при дальнейшей эксплуатации необходимо провести микроанализ для выявления состояния карбидной структура у «верхней» поверхности колосника.

В результате, за 12-ть месяцев эксплуатации (проведения промышленных испытаний) были сформированы акты контроля состояния колосников из опытной партии, включающие в себя: анализ наличия/отсутствия дефектов в колосниках, причины замены колосников (при наличии этих замен) и фото-фиксацию состояния колосникового поля каждый квартал (каждые 3-и месяца). Исходя из этих актов следующие выводы (приложения 12 и 13):

1. На протяжении срока испытаний при эксплуатации не выявлено дефектов колосников и выходов из строя по любым причинам, что отражено в ежемесячных актах (приложения 12 и 13). В настоящее время эксплуатация партии продолжается в полном объёме, замечаний нет.

2. На протяжении срока испытаний при эксплуатации не выявлено предпосылок для выхода из строя колосников (МКК, трещин и других видимых дефектов, см. рис. 46).

3. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 12-и месяцев эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК») при условии соблюдения требований:

- Термообработка: закалка t=1100°C, τ=80мин на воздухе и отпуску t=900°C, τ=150 мин..
- Ограничение содержания «C» - 0,30÷0,40 %.
- Увеличение диапазона содержания «Si» в стали 40Х24Н12СЛ от предусмотренного по ГОСТ 977-88 - 0,5÷1,5% Si, до диапазона 0,5÷2,0 % Si.

4. Удельный расход колосников поставки «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии, ниже на 23,13 % по сравнению с колосниками поставки ф. Outotec, принятыми за эталон.

5. При заказе колосников «ЧЛМЗ» по экспериментальной технологии на на 2020÷2021 гг. потребность составит 33 743 шт. (на 7 805 шт. меньше по сравнению с потребностью в колосниках поставки Outotec на этот период).

6. По результатам 12-и месяцев испытаний руководством ФОК АО «СГОК» принято решение рекомендовать колосники, изготовленные по экспериментальной технологии к применению на ОМ ФОК АО «СГОК».

7. Принято решение закончить промышленные испытания по РП № 26/20.02-18 с положительным заключением о применении.

8. Продолжить отслеживание качества колосников экспериментальной партии производить силами ФОК и Ремонтного Комплекса (РК) АО «СГОК».

В дальнейшем необходимо выполнить металлографический анализ структуры для определения склонности детали к МКК при последующей эксплуатации и выявления причин повышенной жаростойкости по сравнению с эталонными колосниками поставки ф. Outotec, для чего нужно провести лабораторные испытания структуры колосников от обоих поставщиков (эталонных от Outotec и экспериментальных от ОАО «ЧЛМЗ»).

5.3.2 Металлографический анализ «эталонных» и опытных колосников до и после 12-и месяцев эксплуатации

Целью металлографических исследований было: выявление скрытых дефектов опытных колосников (склонности к МКК), выявления причин повышенной жаростойкости по сравнению с эталонными колосниками поставки ф. Outotec и определение качества структуры детали (качества разливки и последующей термообработки). Анализ экспериментальных колосников поставки ОАО «ЧЛМЗ» выполнен в сравнении с эталонными колосниками поставки ф. Outotec (стойкость которых, в среднем, более 3-х лет). Исследования проведены на

4-х образцах: до эксплуатации (новых) и после 12-и месяцев эксплуатации от обоих поставщиков, полученных из средних частей деталей (см. рис. 48).

Исследования микроструктуры производились при помощи анализатора изображений THIXOMET PRO.

Колосники поставки Outotec изготовлены по требованиям EN 1.4837 (GX40CrNiSi25-12) с применением стандартной закалки при температуре 1100°C. Колосники поставки ОАО «ЧЛМЗ» изготовлены по экспериментальной технологии, описанной ранее: сталь после разливки подвергается закалке на воздухе (выдержке в течении 80 минут при температуре 1100°C) с последующим отпуском (выдержке в течении 150 минут при температуре 900°C) и содержит модифицированный химический состав для воспроизводимости результатов термообработки, а именно – дополнительное (нижнее) ограничение по содержанию углерода – 0,30 %, а также повышенный верхний предел содержания кремния – 2,0 %.

Рисунок 48. Фото разреза новых колосников ф. Outotec – выше и ОАО «ЧЛМЗ» – ниже для выполнения металлографических исследований

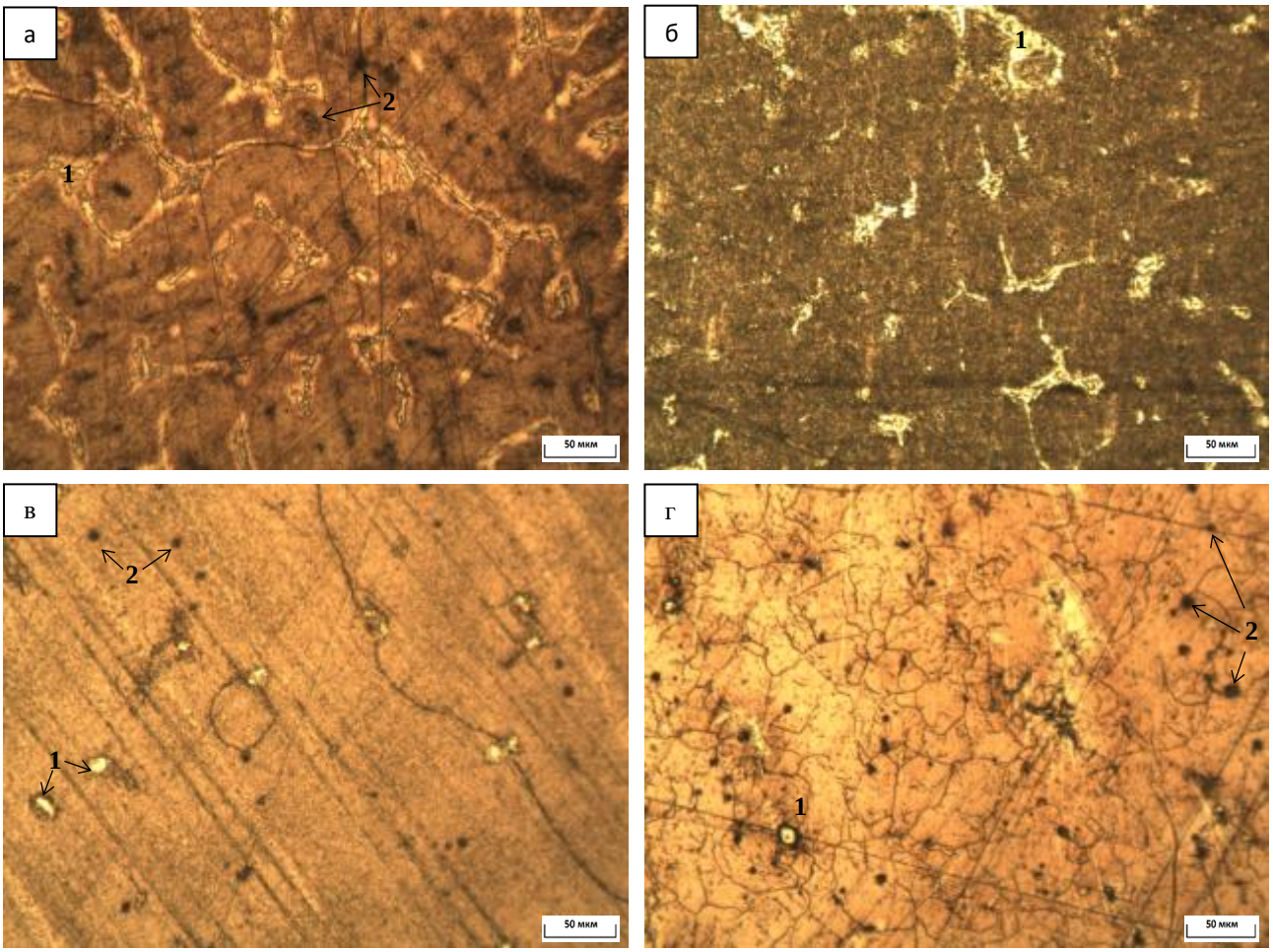


Рисунок 49. Микроструктура 1,5-3,0 мм плоскости контакта колосников с окатышами, увеличение х150

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, образовавшиеся в результате разрушения карбидов при подготовке шлифа

В результате микроанализа колосников поставки ф. Outotec (подвергавшихся только закалке, при температуре 1100°С при идентичном стали 40Х24Н12СЛ химическом составе (марка EN 1.4837, GX40CrNiSi25-12)) установлено, что в структуре новой детали обильное количество крупных первичных карбидов *1* (рис. 49а, 50,а). Расстояние между карбидами достаточное (более 15 мкм) для высокой стойкости детали к межкристаллитной коррозии, таким образом преждевременный выход колосников в брак маловероятен. Но необходимо отметить, что высокая

концентрация карбидов хрома (по типу $Cr_{26}C_6$) обуславливает обеднение прилегающих к карбидам участков матрицы металла хромом и углеродом. Как уже сказано ранее, хром – основной элемент, определяющий жаростойкость и коррозионную стойкость, а выход углерода из матрицы металла вызывает фазовый переход аустенит-феррит, что также негативно сказывается на стойкости колосников в виду перераспределения объёмов внутри детали.

Структура детали поставки ф. Outotec после 12-и месяцев эксплуатации отличается от литой только формой карбидных выделений $Cr_{26}C_6$ – произошло округление протяженных выделений (рис 49,б) и незначительное дополнительное выделений мелких округлых карбидов едва-различимых при большем увеличении (рис. 50,б). Низкая интенсивность выделения карбидов говорит о приближении структуры детали к равновесному состоянию. Оставшиеся после закалки карбиды со средними размерами начали округляться и расти. Это характерное изменение структуры происходит во всех деталях при эксплуатации. В структуре колосников после эксплуатации не обнаружены признаки межкристаллитной коррозии и других структурных дефектов, характерных для колосников, качество детали для длительной эксплуатации (не менее 2-х лет) – удовлетворительное.

В результате микроанализа экспериментальных колосников поставки ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ изготовленных по требованиям ГОСТ 977-88 и подвергнутых экспериментальной термообработке (закалка при температуре 1100°С и последующий отпуск при температуре 900°С) установлено, что структура новой детали поставки «ЧЛМЗ» (рис. 49,в) насыщена карбидами глобулярной формы малой протяжённостью границ *1* и большим расстоянием между крупными выделениями карбидов *1* (большим, чем в структуре колосников, поставки Outotec). Такая структура исключает возможность протекания межкристаллитной коррозии и в меньшей степени обедняет матрицу металла хромом и углеродом (в меньшей степени понижает жаростойкость), чем в эталонных колосниках. Первичные карбиды растворены в структуре детали поставки «ЧЛМЗ» (рис 50,в), благодаря правильно подобранному (большему) времени выдержки при закалке (80 минут) и, чего нельзя сказать о колосниках поставки Outotec (рис 50,а). Карбидные

выделения имеют более благоприятную округлую форму и распределение, что особо хорошо видно при малых увеличениях (рис 45).

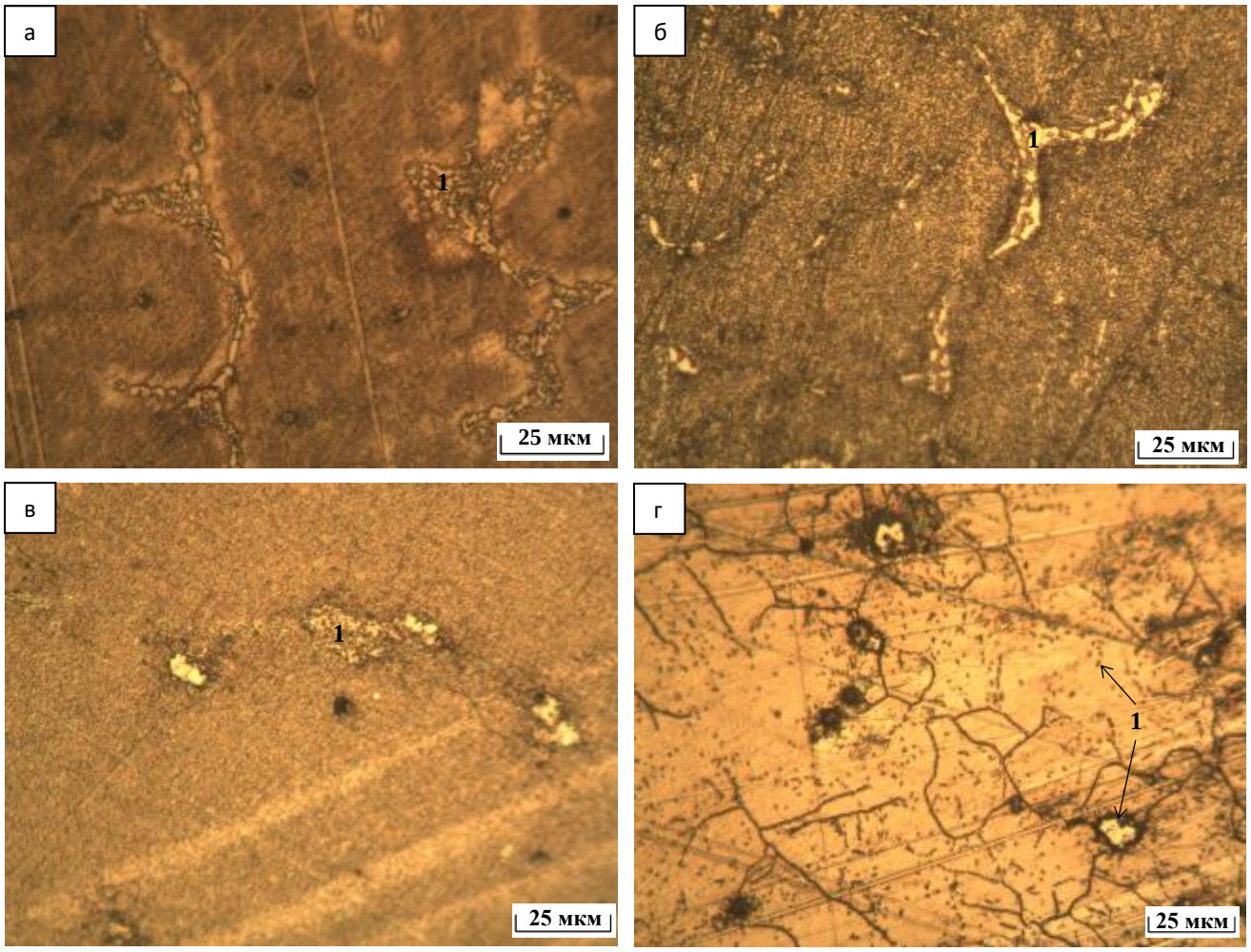


Рисунок 50.Микроструктура 1,5-3,0 мм плоскости контакта колосников с окатышами, увеличение х300

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, образовавшиеся в результате разрушения карбидов при подготовке шлифа

В структуре колосников поставки «ЧЛМЗ» после 12-и месяцев эксплуатации первичные карбиды *1* укрупнились и еще более округлились (рис 49,г). Помимо этого, появились мелкие (менее 1 мкм) карбидные выделения, равномерно

распределенные по структуре металла (рис. 50,г). Таким образом, в структуре стали создано большое количество новых центров кристаллизации, преимущественно в которых, при эксплуатации, процесс карбидообразования продолжится, но уже в меньшей степени, так как структура после термообработки приведена к более равновесному состоянию при температуре эксплуатации, чем структура после литья или литья с закалкой.

За 12-ть месяцев эксплуатации экспериментальной партии колосников поставки ОАО «ЧЛМЗ» в структуре детали не выявлено негативных процессов и изменений, что позволяет сделать вывод об удовлетворительном качестве экспериментальной партии, о соответствии качества колосников экспериментальной партии заявленным требованиям и, о большом потенциальном эксплуатационном ресурсе колосников, изготовленных по экспериментальной технологии.

По результатам выполненного анализа микроструктуры колосников поставки Outotec и «ЧЛМЗ» до и после 12-и месяцев эксплуатации:

1. Не выявлено дефектов структур в деталях обоих поставщиков.

2. Не выявлено предпосылок для выхода из строя колосников обоих поставщиков, в том числе (в главной степени) предпосылок к развитию межкристаллитной коррозии в результате неблагоприятного выделения карбидной фазы $Cr_{26}C_6$ (главному фактору преждевременного выхода из строя колосников).

3. Колосники, изготовленные по опытной технологии, обладают более благоприятной карбидной структурой (меньшей протяженностью границ карбидных выделений), в меньшей степени обедняя металл хромом, чем может объясняться повышенная на 23,13% жаростойкость экспериментальных колосников по сравнению с эталонными от ф. Outotec, выявленная ранее.

В результате промышленных испытаний установлено, что разработанная технология получения опытной партии колосников (термообработка: закалка в течении 120 минут при температуре 1200 °С и охлаждение на воздухе и последующий отпуск при температуре 900°С в течении 150 минут при

скорректированном химическом составе стали: углерод 0,3÷0,4% и кремний 0,5÷2,0%) позволяет достичь высоких эксплуатационных характеристик, а именно:

- к отсутствию склонности колосников к МКК,
- отсутствию в колосниках литейных дефектов – трещин и коробления,
- повышенной на 23,13% жаростойкости по сравнению с эталонными колосниками поставки ф. Outotec в связи с глобурярной формой карбидных выделений с минимальной протяжённостью границ, вдоль которых происходит обеднение матрицы металла хромом.

Исходя из проведенных ранее исследований – 100% колосников из стали 40Х24Н12СЛ выходили из строя на сроке эксплуатации менее 2-х лет, основываясь на данном исследовании, можно сделать вывод, что срок эксплуатации колосников, изготовленных по экспериментальной технологии составляет не менее 2-х лет и основной причиной выхода из строя этих колосников, можно считать плановый угар поверхности, который протекает крайне медленно, и прогнозный срок эксплуатации при текущем режиме эксплуатации ОМ (тепловом режиме) составит в среднем 5-ть лет (по опыту родственных предприятий – АО «Лебединский ГОК» и АО «ОЭМК», использовавших эталонные колосники поставки ф. Outotec).

5.3.3 Результаты проведения промышленных испытаний опытной партии литых колосников на АО «Стойленский ГОК» по факту завершения промышленных испытаний (26-ти месяцев эксплуатации)

По факту истечения 12-и месяцев эксплуатации промышленные испытания были продолжены (до истечения как минимум 24-х месяцев эксплуатации). Необходимости в составлении ежемесячных актов контроля не было. Поэтому, в этот период был составлен только один акт – итоговый, по истечению 2-х лет эксплуатации (приложение 14).

Так, датой завершения промышленных испытаний стало 29.12.2020 (таблица 30). С учетом всех осмотров – опытная партия, установленная на о/т №175 пробыла в эксплуатации суммарно 785 суток (~2,15 года или ~26 месяцев), данные

приведены в таблице 30 в сравнении с «эталонными» колосниками ф. Outotec, установленными на о/т №134 (дальнейшее сравнение будет выполнено именно с этой партией). Параметры установок / снятий с ОМ и ремонта колосников взяты из актов/эксплуатационных журналов участка обжига Фабрики Окомкования АО «Стойленский ГОК».

Таблица 30. Время в эксплуатации колосников в соответствии с цеховой учётной документацией

О/Т №	Установка на ОМ	Снятие с ОМ	Время в работе, суток	Время в работе, лет
№175 (ЧЛМЗ)	16.10.2018	21.05.2019	217	0,59
	31.05.2019	06.11.2019	159	0,44
	16.11.2019	29.12.2020	409	1,12
		СУММА	**785**	**2,15**
№134 (Outotec)	01.10.2016	08.01.2018	464	1,27
	28.01.2018	14.10.2018	259	0,71
	16.10.2018	20.11.2019	400	1,10
	30.11.2019	28.12.2020	394	1,08
		СУММА	**1517**	**4,16**

На протяжении более 2-х лет эксплуатации не было выявлено дефектов и предпосылок к ним, что также отражено в актах (приложения 14,15). В настоящее время эксплуатация партии продолжается в полном объёме, состояние колосникового поля удовлетворительное, замечаний нет (рис. 51).

Для определения жаростойкости экспериментальной партии колосников поставки «ЧЛМЗ» были выполнены замеры веса до и после 26-и месяцев эксплуатации, которые были сравнены с аналогичными показателями колосников поставки ф. Outotec (табл. 31, прил. 14).

Сравнение жаростойкости колосников от разных поставщиков произведены по угару (столбец 8 таблицы 30) как средняя потеря массы в кг. на единицу (штуку) в год (разница массы колосников до и после эксплуатации), погрешность замеров сведена к минимуму количеством взвешиваний (приложение 14) и выполнением

взвешиваний на поверенных лабораторных весах (рис. 52). Итоговый вывод: экспериментальная партия колосников имеет на **7,23%** выше жаростойкость по отношению к колосникам поставки ф. Outotec.

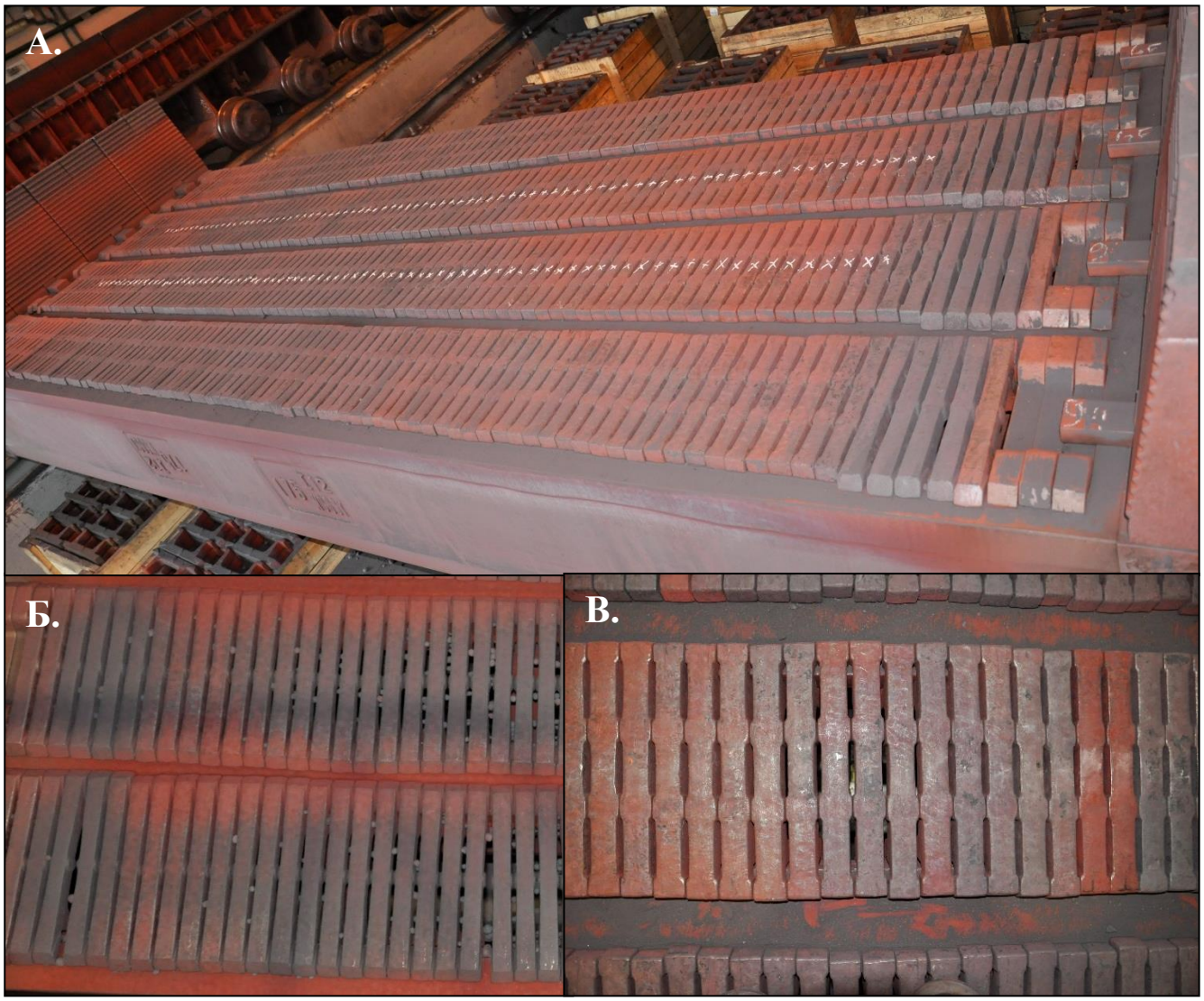


Рисунок 51. Фото колосников опытной партии, поставки «ЧЛМЗ» после 26-и месяцев эксплуатации и применяемых колосников, поставки Outotec

А, В. ЧЛМЗ, экспериментальная технология, 26 месяцев эксплуатации;

Б. Outotec, 50 месяцев эксплуатации.

Потери по браку (столбец 11 таблицы 31) определены как % вышедших из строя от количества установленных колосников этого типа (376 шт. рабочих колосников). На протяжении промышленных испытаний (2,15 лет) экспериментальная партия колосников не имеет потерь по браку и не имеет

предпосылок к раннему выходу из строя (что видно на рис. 51). Учитывая, что на практике все дефекты литья проявляются на протяжении первого года эксплуатации, можно сделать вывод, что оба поставщика показали высокое качество литья и при правильной эксплуатации дефектообразование колосников обеих партий возможно лишь по механизму высокотемпературной коррозии (угару), который невозможно устранить/исключить. Соответственно, предлагается сравнивать эти показатели только после определения полного среднего срока службы поставщиков от обеих партий, который по обеим партиям еще не наступил.

Сравнение стойкости выполнено по удельной норме (столбец 12 таблицы 31). Этот показатель включает только разницу в жаростойкости и не включает дополнительную разницу по выходу в брак. Удельная норма рассчитана как отношение суммарной потери веса всех установленных колосников (111 672 шт.) за год эксплуатации к производительности ОМ (7 млн.т. в год). Таким образом, удельный расход колосников опытной партии поставки ЧЛМЗ на **7,23%** меньше (или на 0,120 кг/тыс.т.), чем у колосников поставки ф. Outotec. При этом, с учётом текущих потерь по браку, колосники опытной партии показали превосходящее на 14,5% качество по сравнению с колосниками Outotec.

Таблица 31. Жаростойкость колосников поставки ЧЛМЗ (экспериментальная технология) и Outotec

№	Поставщик	Марка стали	Срок эксплуатации, г.	Производительность ОМ, тыс.т.	Вес, кг	Брак, шт.	Средняя потеря в весе колосника за весь срок экспл., кг/шт	Средний угар, кг/шт в год	Потери по браку %	Удельный расход, кг/тыс.т. (без/с учетом брака)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
1	Outotec	1.4837 (GX40CrNiSi25-12)	0	-	4,050 [12]	-	-	-	-	-
2			4,16	7 000	3,618	32[13]	0,208	0,1040	8,51%	**1,659/1,800**
3	ЧЛМЗ	40Х24Н12СЛ Экспериментальная технология	0	-	4,090 [14]	-		-	-	-
4			2,15	7 000	3,883	-	0,432	0,0965	-	**1,539**

[12] По данным документации (чертежей) в связи с отсутствуем замеров веса новых и возможности выполнить такие замеры.
[13] По актам, ТО О/Т (переборка поля) от 20.11.2019, выбраковка по угару, дальнейший учет в угаре по весу.
[14] По результатам взвешиваний, зафиксированных в актах входного контроля.

Рисунок 52. Поверка весов

Расчёт потребности показан в таблице 32. Учитывая, что текущая потребность в колосниках на ФОК СГОК составляет 1050 шт./мес. (12 600 шт./г.) при 7 млн.тонн. окатышей в год, а потребность, основанная на удельной норме экспериментальной партии колосников ЧЛМЗ составит 900 шт./мес. (10 800 шт./г.) разница составит 150 шт./мес. (1 800 шт./г.).

Таблица 32. Расчёт потребности в колосниках

Параметр	**Расход колосников**	
	в мес.	**в год**
По удельной норме Outotec		
- *без учета выхода в брак*	969	11 620
- *с учетом выхода в брак*	1051	12 603
По удельной норме ЧЛМЗ	900	10 800
Текущая потребность ФОК СГОК	1050	12 600

Выводы: колосники, изготовленные ЧЛМЗ по экспериментальной технологии, показали превосходящие эксплуатационные характеристики по сравнению с колосниками поставки ф. Outotec (уменьшенный на **7,23%** удельный расход). В связи со всем вышеизложенным предлагается рекомендовать к использованию на ФОК СГОК колосники поставки «ЧЛМЗ», изготовленные по экспериментальной технологии, а испытания по РП № 26/20.02-18 закончить.

По результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 26-и месяцев эксплуатации на ФОК АО «СГОК» был подписан итоговый акт контроля качества экспериментальной партии, включающий выводы по колосникам опытной партии:

1. Не выявлено дефектов колосников.

2. Не выявлено предпосылок для раннего выхода из строя колосников.

3. Удельный расход колосников поставки «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии, составил 1,539 кг./тыс. т., что ниже на **7,23%** по сравнению с колосниками поставки ф. Outotec.

4. При заказе колосников «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии, годовая потребность в колосниках уменьшится на 1 800 шт.

5. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 26-и месяцев эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК») при условии соблюдения требований изготовления:

- Термообработка: закалка t=1100°C, τ=80мин на воздухе и отпуску t=900°C, τ=150 мин..
- Ограничение содержания «C» - 0,30÷0,40 %.
- Увеличение диапазона содержания «Si» в стали 40Х24Н12СЛ от предусмотренного по ГОСТ 977-88 - 0,5÷1,5% Si, до диапазона 0,5÷2,0 % Si.
- Рекомендовать колосники поставки «ЧЛМЗ» к применению на ФОК СГОК.

6. Предлагается закончить испытания по РП № 26/20.02-18 с положительным заключением.

В дальнейшем, вышеописанные выводы были вынесены на Технический Совет АО «Стойленский ГОК» для утверждения (орган, в котором принимают участия директора по направлениям, под председательством генерального директора АО «СГОК»).

Решение Технического Совета СГОК (приложение 15):

- Утвердить результаты промышленных испытаний колосников (выводы, содержащиеся в «Акте контроля качества опытной партии изготовленных по экспериментальной технологии по факту завершения промышленных испытаний» от 18.02.2021), изготовленных по экспериментальной технологии, поставки ОАО «ЧЛМЗ».
- Закончить испытания по РП № 26/20.02-18 с положительным заключением.

5.4 Определение экономического эффекта от применения литых колосников, изготовленных по экспериментальной технологии

Экономический эффект от применения колосников, изготовленных по экспериментальной технологии (термообработка: закалка в течении 120 минут при температуре 1200 °С и охлаждение на воздухе и последующий отпуск при температуре 900°С в течении 150 минут при скорректированном химическом составе стали: углерод 0,3÷0,4% и кремний 0,5÷2,0%), взамен эталонных от ф. Outotec складывается из двух составляющих:

1) разницы в цене (с учетом курса валют),
2) разницы в потребном количестве (определяемом удельной нормой расхода колосников на тонну продукции).

Расчет экономического эффекта выполнен через удельную норму потребления колосников и приведен в таблице 33. Удельный расход колосников (п.2 таблицы 33) при производительности обжиговой машины в 7,0 млн. тонн в год от разных поставщиков взят из таблицы 32, учитывая план по выходу на производительность ФОК в 8,0 млн. тонн к 2021 году, удельный расход от обоих поставщиков был увеличен на 21,72% на этот период (что соответствует фактическому росту удельного расхода колосников поставки ф. Outotec при увеличении производительности ФОК с 6.0 до 7.0 млн. тонн в год).

Цена колосников поставки ф. Outotec была увеличена на 15% (п.7 таблицы 33), фактическая цена закупки последней партии в 2016 году – 32,54 EUR за штуку, после этого закупки не проводились ввиду большого запаса колосников на ФОК. Таким образом, 15% – это поправочный коэффициент, введенный для приведения цен к уровню 2019 года (зависимостью цены от размеров партии решено пренебречь, ввиду отсутствия данных от ф. Outotec). Цена колосников, изготовленных по экспериментальной технологии – факт, указана в спецификации (приложение 5).

Таблица 33. Расчет экономического эффекта (EBITDA[15]) от применения на Фабрике окомкования АО «СГОК» колосников, изготовленных по опытной технологии, взамен эталонных, поставки от ф. Outotec

№ п/п	Наименование показателя	ед. изм.	Эталонные колосники ф. OUTOTEC сталь 1.4837, GX40CrNiSi25-12; ОЗМ 642300			Опытные колосники ОАО ЧЛМЗ сталь 40Х24Н12СЛ; ОЗМ 713596		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Плановый объём производства	тыс. тонн	6 000	7 000	8 000	6 000	7 000	8 000
2	Удельная норма расхода (см. таблицу 32)	кг./тыс. тонн	3,59	4,37	5,32	-	2,99	3,64
3	Вес колосника	кг./шт.	4,050			4,114		
4	Потребное количество колосников	кг.	21 540,0	30 590,0	42 555,8	-	20 930,0	29 117,1
5		шт.	5 319	7 553	10 508	-	5 088	7 078
6	Цена без НДС на 2016/2019 год (на условиях поставки DAP[16])	RUR за шт.	2 709,7 ₽			1 920,0 ₽		
7		EUR за шт.	37,4 €			-		
8	Среднегодовой валютный курс за 2019 год	EUR/RUR	72,41			-		
9	Затраты на колосники в ценах 2019 года, без НДС	RUR	14 411 368 ₽	20 466 284 ₽	28 471 997 ₽	-	9 768 012 ₽	13 588 925 ₽
Потребность в колосниках ФОК АО "Стойленский ГОК"			**2020 год / 7 млн. тонн**	**2021 год / 8 млн. тонн**	**2022 год / 8 млн. тонн**	**2020 год / 7 млн. тонн**	**2021 год / 8 млн. тонн**	**2022 год / 8 млн. тонн**
10	Потребность в колосниках	шт.	7 553	10 508	10 508	5 088	7 078	7 078
11		шт.	28 568			19 243		
12	Цена потребности без НДС на 2016/2019 год (на условиях поставки DAP[13])	RUR	20 466 284 ₽	28 471 997 ₽	28 471 997 ₽	9 768 012 ₽	13 588 925 ₽	13 588 925 ₽
13		RUR	77 410 277 ₽			36 945 862 ₽		
14	**Эффект на EBITDA (разница эталонного варианта с опытным)**	**RUR**	-	-	-	**10 698 272 ₽**	**14 883 072 ₽**	**14 883 072 ₽**
15		**RUR**	**40 464 415 ₽**					

[15] EBITDA (аббр. англ. Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization) — аналитический показатель, равный объёму прибыли до вычета расходов по выплате процентов, налогов, износа и начисленной амортизации.
[16] delivered at place – доставка до потребителя

Потребное количество колосников в килограммах (п.4 таблицы 33) получено произведением удельной нормы (п.2 таблицы 33) и производительности (п.1 таблицы 33). Потребное количество колосников в шт. (п.5 таблицы 33) получено делением потребного количества колосников в килограммах (п.4 таблицы 33) на вес колосника от каждого поставщика соответственно (п.3 таблицы 33).

Затраты на потребное количество колосников (п.9 таблицы 33), с учетом годовой производительности ФОК (через удельные нормы), получены произведением цены (п.6 таблицы 33) и потребного количества колосников (п.5 таблицы 33) от каждого поставщика соответственно.

Далее, была рассчитана годовая потребность в колосниках (п.10 таблицы 33) и денежная потребность в деньгах, для закупки соответствующей партии на условия DAP (п.12 таблицы 33) от каждого поставщика соответственно. Сравнивая эти данные можно сделать выводы об экономическом эффекта от замены эталонных колосников от ф. Outotec на экспериментальные колосники отечественного производства. Так, определив потребность в колосниках через удельную норму их расхода, в 2020÷2022 гг. будет использовано 28 568 шт. эталонных колосников от ф. Outotec или 19 243 шт. колосников отечественного производства, полученных по экспериментальной технологии, что на 9 325 шт. меньше. Дополнительно учитывая разницу в цене – экономический эффект (экономия) составляет 40 464 415₽ (на EBITDA[12]) за 2020÷2022 гг.

5.5 Выводы

Были выполнены промышленные испытания партии колосников, изготовленных по опытной технологии (безопочная формовка ХТС на 6 деталей с окраской полуформ противопригарной цирконовой краской при коэффициенте массы литниково-питающей системы k = 2.1, с температурой заливки в форму – 1560+20°, термообработка: закалка в течении 120 минут при температуре 1200 °С и охлаждение на воздухе и последующий отпуск при температуре 900°С в течении 150 минут при скорректированном химическом составе стали: углерод 0,3÷0,4% и кремний 0,5÷2,0%), успешно прошедшей входной контроль (проверку допусков веса и основных геометрических размеров на соответствие требованиям чертежей и нормативной документации, проверку на отсутствие литейных дефектов, проверку химического состава).

Длительность испытаний составила 26-ть месяцев, по результатам которых не выявлено дефектов колосников и выходов из строя по любым причинам (в том числе не выявлено предпосылок раннего выхода из строя по МКК, трещинам, короблению и другим дефектам). В настоящее время эксплуатация партии продолжается в полном объёме, замечаний нет.

Для определения качества опытной партии колосников их сравнивали с колосниками поставки ф. Outotec из стали GX40CrNiSi25-12, принятыми за «эталон» ввиду их высокого качества. В результате, сравнения было установлено, что удельный расход колосников опытной партии, изготовленных по экспериментальной технологии, ниже на 7,23÷23,13 % по сравнению с колосниками поставки ф. Outotec. В результате чего, руководством Фабрики окомкования АО «СГОК» принято решение рекомендовать колосники, изготовленные по экспериментальной технологии к применению на обжиговой машине и закончить промышленные испытания по РП № 26/20.02-18 с положительным заключением.

В результате лабораторного микроанализа структуры опытных и эталонных колосников до и после 12-и месяцев эксплуатации были сделаны выводы о достаточном качестве структуры колосников от обоих поставщиков, с

существенным отличаем в структуре карбидной фазы. Так, колосники, изготовленные по опытной технологии, обладают более благоприятной карбидной структурой (меньшей протяженностью границ карбидных выделений), в меньшей степени обедняя металл хромом в прилегающих участках, чем может объясняться повышенная на 7,23÷23,13% жаростойкость экспериментальных колосников по сравнению с эталонными от ф. Outotec, выявленная ранее.

В результате промышленных испытаний установлено, что разработанная технология получения опытной партии колосников (термообработка: закалка в течении 120 минут при температуре 1200 °С и охлаждение на воздухе и последующий отпуск при температуре 900°С в течении 150 минут при скорректированном химическом составе стали: углерод 0,3÷0,4% и кремний 0,5÷2,0%) позволяет достичь высоких эксплуатационных характеристик, а именно:

- к отсутствию склонности колосников к МКК,
- отсутствию в колосниках литейных дефектов – трещин и коробления,
- повышенной на 7,23÷23,13% жаростойкости по сравнению с эталонными колосниками поставки ф. Outotec в связи с глобурярной формой карбидных выделений с минимальной протяжённостью границ, вдоль которых происходит обеднение матрицы металла хромом.

Таким образом, срок эксплуатации колосников, изготовленных по экспериментальной технологии составляет не менее 3-х лет и основной причиной выхода из строя этих колосников, можно считать плановый угар поверхности, который протекает крайне медленно. Прогнозный срок эксплуатации при текущем тепловом режиме ОМ составит в среднем 5÷7 лет, а экономический эффект от применения опытных колосников взамен эталонных за период 2020÷2022 гг., рассчитанный через удельные нормы потребления, составляет 40 464 415₽ (на EBITDA[12]).

Промышленными испытаниями колосников, изготовленных по опытной технологии, доказана практическая значимость и применимость выполненных в рамках данной работы изысканий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Учитель А.Д., Гасик М.И., Панченко А.Н. Исследование химической эрозии колосников конвейерных машин при обжиге железорудных окатышей. Сообщ. 1. Исследование литой структуры исходных колосников из стали 40Х24Н12СЛ. – Металлургическая и горнорудная промышленность. 2008. № 1. С. 55-61.

2. ГОСТ 977-88. Отливки стальные. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 977-75, ГОСТ 2176-76; Введ. с 01.01.90. – Москва: Изд-во стандартов, 2004. – 33 С.

3. Drotlew A., Garbiak M., Piekarski B. Cast Steels for Creep-resistant Parts Used in Heat Treatment Plants. “Archives of Foundry Engineering”, 2012, Volume 12, Number 4, p. 31-38(8).

4. Поисковой запрос известных марок сталей для изготовления колосников (в мире) [Электронный ресурс]. – CM KEY TO MATEREALS, The wold’metals database 2021 – Режим доступа: http://search.totalmateria.com/MaterialDetails/, ограниченный (по регистрации). – Загл. с экрана.

5. Uchitel A.D., Panchenko A.N., Ivanov A.S., Gribenko N.P. Influence of technological mode of operations of roaster machine on firmness of furnace-bars. – New technologies. 2008. № 4. P. 199-202.

6. Буткарёв А.А., Буткарёв А.П. Оптимизация параметров процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах. – Сталь. 2000. № 4. С. 10-15.

7. Копоть Н.Н., Воробьёв А.Б., Гончаров С.С., Буткарёв А.А., Буткарёв А.П. Сравнительный анализ теплотехнических схем современных обжиговых конвейерных машин. – Сталь. 2010. № 3. С. 8-13.

8. Буткарёв А.А., Буткарёв А.П., Бородин А.А., Жилин С.Н., Малявин Б.Я. Опыт эксплуатации модернизированных обжиговых машин Лебединского ГОКа и пути их совершенствования. – Сталь. 2005. № 3. С. 7-10.

9. Сокол И. Я., Ульянин Е. А., Фельдгандлер Э. Г. И др.Структура и коррозия металлов и сплавов. Атлас. Справичник. М.: Металлурия, 1989, с. 400.

10. ГОСТ 6130-71. Металлы. Методы определения жаростойкости. Введ. с12.02.71. – Москва: Государственный Комитет Стандартов Совета Министров СССР, 1972. – 16 С.

11. Венедиктов А.Н., Путилова У.С., Соколов Р.А., Теплоухов О.Ю., Гультяев Д.С. Моделирование диффузионного насыщения углеродом аустенита, легированного хромом. – Инженерный вестник Дона. Сетевое издание. 2019. № 9.

12. ГОСТР 53464-2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. Введ. с09.12.09. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 56 С.

13. ГОСТ 3212-92. Комплекты модельные. Уклоны формовочные, стержневые знаки, допуски размеров. Введ. с 01.07.93. – Москва: ИПК изд-во стандартов, 2004. – 16 С.

14. Буткарёв А.А., Буткарёв А.П., Зинчук Б.А., Шевченко А.А., Дворниченко И.Ф., Посохов А.В. Разработка технологических решений по увеличению производительности обжиговой машины фирмы «Лурги». – Сталь. 2007. № 6. С. 2-6.

15. Буткарёв А.А., Буткарёв А.П. Оценка реверсивной схемы охлаждения окатышей на обжиговых машинах. – Сталь. 2005. № 4. С. 71-73.

16. Буткарёв А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах. – Сталь. 2011. № 5. С. 4-8.

17. Буткарёв А.А., Буткарёв А.П., Гриненко Н.В., Жомирук П.А., Мартыненко В.В. Отработка технологических режимов термообработки окатышей на модернизированной обжиговой машине ОК-124. – Сталь. 2010. № 3. С. 16-19.

18. Маерчак Ш. Производство окатышей. М.: Металлургия, 1982, 232 с.

19. Обзор рынка железорудного сырья (железная руда, концентрат, агломерат и окатыши) в России. Издание 5-е. [Электронный ресурс]. – М.: ООО «ИГ» «Инфомайн», 2014 – Режим доступа: http://www.infomine.ru/files/catalog/1/file_1_eng.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

20. Учитель А.Д., Гасик М.И., Панченко А.Н. Исследование химической эрозии колосников конвейерных машин при обжиге железорудных окатышей. Сообщ. 2. Исследование микроструктуры окалины и реакционной зоны колосника из стали 40Х24Н12СЛ, изъятого из эксплуатации. – Металлургическая и горнорудная промышленность. 2008. № 2. С. 26-30.

21. Юсфин Ю. С., Базилевич Т. Н. Обжиг железорудных окатышней. – Москва: Металлургия, 1973. – 272 с.

22. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии. – Москва: Физматлит, 2002. – 334 с.

23. Куликов И. С., Комиссаров Г. М. Изв. АН СССР, Металлы, 1965, № 1, с. 3 – 10.

24. Борнацкий И. И. Десульфурация металла. Изд-во: Металлургия, 1970. – 320 с.

25. Бутаков Д.К., Мельников Л.М.,Рудаков И.П., Маслова Ю.Н. Межзёренные трещины и флокены в стальных отливках. – Литейное производство. 1968. № 4. С. 33-35.

26. Бернштейн М.Л., Добаткин С.В., Капуткина Л.М., Прокошкин С.Д.Справочник. Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей. – Москва: Металлургия, 1989. – 477 с.

27. Гуляев А. П., Гуляев А. А. Металловедение. Учебник для вузов 7-е издание. – Москва: Металлургия, 2011. – 643 с.

28. БуткарёвА.А., БуткарёвА.П., Ащеулов В.Н., Жомирук П.А., Мартыненко В.В.Пути повышения показателей работы первых в СССР обжиговых машин АО ССГПО. – Сталь. 2008. № 5. С. 2-5.

29. Учитель А.Д., Гасик М.И., Панченко А.Н.Исследование химической эрозии колосников конвейерных машин при обжиге железорудных окатышей. Сообщ. 3. Высокотемпературная химическая эрозия колосников из стали 40Х24Н12СЛ при взаимодействии окалины с карбонатом натрия. 2008. № 2. С. 31-35.

30. Штрюбель Г., Циммер З.Х. Минералогический словарь. – М.: Недра, 1987. – 494 с.

31. Минералогическая энциклопедия / Под ред. К. Фремя. Пер. с англ. – М.:Недра, 1985. – 512 с.

32. Эйтель В. Физическая химия силикатов / Пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 1052 с.

33. Гудремон Э. Специальные стали.т1. М. Металлургия, 1959, 952с.

34. Herbert H. Uhlig, R. WimstonRevie. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering, Fourth Edition.– P. 479.

35. Биркс Н., Майер Дж. Введение в высокотемпературное окисление металлов. М.: Металлургия, 1987, 189 с.

36. Тулин НА, Кудрявцев.В.С., Пчелкин С.А. и др. Развитие бескоксовой металлургии. М.: Металлургия, 1987, 328 с.

37. ГОСТ 5632—72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Введ. С 01.01.75. – Москва: Изд-во стандартов, 1997. – 61 С.

38. Шлямнев А. П. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы. Справ. изд. – М.: Интермет Инжиниринг. – 2000. – 232 с.

39. Жаростойкая сталь: пат. 1607428 Рос. Федерация. № 2007145150/02, заявл. 04.12.07; опубл. 27.07.09, Бюл. № 21 5 с.

40. Литая жаростойкая сталь: пат. 2550457 Рос. Федерация. № 2013159138/02, заявл. 30.12.13; опубл. 10.05.15, Бюл. № 13 15 с.

41. Жаростойкая сталь: пат. 2362830 Рос. Федерация. № 2007145150/02, заявл. 04.12.07; опубл. 27.07.09, Бюл. N 21. – 4 с.

42. ГОСТ 13568-97 (ИСО 606-94). Цепи приводные роликовые и втулочные. Общие технические условия. Введ. С 25.04.97. – Москва: Изд-во стандартов, 2000. – 24 С.

43. Перевязко А.Т., Смирнов В.М., Черевко П.В., РезинкинаГ.П.Экономно легированные никелем жаростойкие литейные стали. Литейное производство, 1991, №5, с.10.

44. Лунев В.В., Ивахненко Е.И., Ферьков В.А., Минакова В.И. Повышение стойкости литых деталей горнометаллургического оборудования. Литейное производство, 1992, №10, с.15-16.

45. Колокольцев В.М., Адищев В.В., Науменко В.Д. и др. Повышение срока службы отливок из жаростойкой стали модифицированием. Литейное производство, 1991, №5, с.19-20.

46. Щегловитов Л.А., Кацаран Т.К., Зелепукин П.А. и др. Модифицированные стали лигатурами с РЗМ. Литейное производство, 1971, №3, с.19-20.

47. Коломбье Л., Гохман И. Нержавеющие и жаропрочные стали. Пер. с фр. М.: Металлургиздат, 1958, с. 479.

48. Кривонос В.Н., Тимофеев П.В., Козлов Л.Я. Новая жаростойкая сталь для эксплуатации при высоких температурах./V Рес. науч. тех. конф. «Повышение технического уровня и совершенствование технологических процессов производства отливок», Днепропетровск, ДМЕТИ, т.2, 1990, с.32-33.

49. Word A.R. Newer Alloys Wriden the Scope for Castings in Heat Treatment Furnaces. “HeatTreat. Metals”, 1997, 4, №4, p.89-94.

50. Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Исследование температур оплавления образующейся при нагреве стали печной окалины. Известия вузов. Черная металлургия, 2005, №9, с.51-52.

51. Крезановский Н.С., Сидоренко М.Ф. Влияние металлического кальция на структуру и свойства литых высоколегированных хромоникелевых сталей. Литейное производство, 1965, №10, с.37-38.

52. Чистяков С.Л., Гуревич Ю.Г., Филатов С.К. и др. Пути улучшения качества сталей и сплавов. Челябинск: Юж. Ур.кн из-во, 1974, 141с.

53. Колокольцев В. М., Гольцов А. С., Столяров А. М. Выбор нового состава жароизносостойкого чугуна. Литейное производство. 2013. №6. С. 2-7.

54. Туфанов Ф.Г. Коррозионная стойкость нержавеющих сталей, сплавов и чистых металлов. Справочник. М. Металлургия, 1982, 352с.

55. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. Iron and steel castings. Terms and definitions of defects. – Переиздание. Январь 1992 г.; Введ. с 01.07.1981. – Москва: Изд-во стандартов, 1992. – 12 С.

56. А.С. КИЛОВ, А.В. ПОПОВ, В.А. Производство заготовок. Литье: Серия учебных пособий. Книга 3. Проектирование и производство отливок (литых заготовок): - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171с.

57. Кондраков М.А., Воробьёв Д.Н., Панасюк С.П., Козелков Н.И., Кондраков А.М. Опыт работы цеха по производству окатышей// Горный журнал. 2012. Специальный выпуск. С. 67 – 69.

58. Гудков А. А. Трещиностойкость стали. – Москва: Металлургия, 1989. – 376 с.

59. Китаев Е. М. – Изв. вузов. Чёрная металлургия. 1976. №1. С. 58-64.

60. Мельникова А.Я. Конструкционные материалы, их свойства и применение: учебное пособие/ Мельникова А.Я., Райский В.В. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2015. – 100с.

61. Беккерт M.N. Справочник по металлографическому травлению, 1979, 340 с.

62. Елагина, О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учеб. пособие / О.Ю. Елагина .— М. : Логос, 2009 .— 488 с. : ил. — (Новая университетская библиотека) – ISBN 978-5-98704-450-6

63. Акшенцева А. П. Металлография коррозионностойких сталей и сплавов. Справичник. – Москва: Металлургия, 1991. – 286 с.

64. Леонович Б.И. Термодинамический анализ и фазовые равновесия в системе железо-хром-углерод. –Вестник ЮУрГУ. 2009. № 36. С. 4-12.

65. ГОСТ 8233-56. Межгосударственный стандарт. Сталь. Эталоны микроструктуры. Steel. Microstructure standarts. – Переиздание. Март 2004.; Введ. с 01.07.1957. – Москва: Изд-во стандартов, 2003. – 12 С.

66. 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.

67. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. — М.: ДМК Пресс, 2006. — С. 240. — ISBN 5-94074-301-3.

68. E. Suli - Finite Element Methods for Partial Differential Equations. - University of Oxford, 2011. – P. 106.

69. Михайлов Б.К., Иванов Б.С. - Муфты с неметаллическими упругими элементами Теория и расчет – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 145 с.

70. Xin L. Thermomechanical behavior in continuous bloom casting with different mold tapers / L. Xin, C. Yong, S. Houfa // Tsinghua Sci. and Technol. - 2008. – Vol. 13, № 5. - P. 598-604.

71. Математическое моделирование процессов обработки давлением / [К. М. Иванов, А. В. Лясников, Л. А. Новиков, Э. Е. Юргенсон]. - СПб.: ТОО "Инвентекс". - 1997. – 268 с.

72. Каплун А. Б. ANSYS в руках інженера / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. - М.: Машиностроение, 2003, 272 с.

73. Захаров, Б.П., Термист / Б.П. Захаров. – Свердловск, Москва: Машгиз [Урало-Сибирское отделение], 1961. – 313 с.

74. Гуляев, А.П., Металловедение: учеб. для студентов вузов / А.П. Гуляев. - 5-е изд., перераб. – М.: Металлургия, 1977. – 647 с.

75. Остапенко, Н.Н., Технология металлов: учеб. для профессионально-технических училищ / Н.Н. Остапенко, Н.Н. Криповницкий. - 2-е изд. – М.: Высш. школа, 1970. – 344 с.

76. Стерин, И. С., Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки: учебное пособие / И.С. Стерин. – СПб.: Политехника, 2003. – 344 с.

77. Буталов, В.А., Технология металлов / В.А. Буталов.- 3-е изд. – М.: Металлургиздат, 1962. – 512 с.

78. 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.

79. Идельчик, Б.М., Защита от коррозии компрессорных машин / Б.М. Идельчик, А. Е. Лященко. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 119 с.

80. Дьяков, В.Г., Легированные стали для нефтехимического оборудования / В.Г. Дьяков, Ю.С. Медведев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1971. – 183 с.

81. Семенова, И.В., Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г.М. Флорианович [и др.]. – М.: Физматлит, 2002. – 336 с.

82. Никольс, Р.В., Конструирование и технология изготовления сосудов давления: пер. с англ. / Р.В. Никольс. – М.: Машиностроение, 1975. – 464 с.

83. Колотыркин, Я.М., Коррозия и защита от коррозии / Я.М. Колотыркин. – Том 3. – М., 1974. – 208 с.

84. Зрунек, М., Противокоррозионная защита металлических конструкций: пер. с чешск. Л.М. Левина / М. Зрунек. – М.: Машиностроение, 1984. – 136 с.

85. Миллер, С.А., Ацетилен, его свойства, получение и применение / С.А. Миллер. – Том 1. – Ленинград: Химия, Ленингр. отд-ние, 1969. – 680 с.

86. Казачков Е.А. Расчёты по теории металлургических процессов, Под ред. Беликова Л. К. М.:Металлургия, 1988.- 288 с.

87. Зубарев К.А. Исследование процессов рафинирования сплавов на основе железа и никеля в вакууме с целью совершенствования технологии плавки в вакуумной индукционной печи: дис. … канд. тех. наук. М., 2016. 171 с.

88. Sigworth G. K. Elliot J. F. Metal science Journal. 1974. V. 8. № 9. P. 298-310.

89. Shubadeeva L.I., Revyakina O.K., Makarchuk T.B., Gurvich L.Ya.The effect of heatings on corrosion resistance of 12Kh18N10T stainless steel // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surface. 1996. V. 2 – P. 119

90. Колесов, А.А. Способы повышения износостойкости хромоникелевой стали 12Х18Н9Т аустенитного класса / А.А. Колесов, В.А. Иванова // Шестьдесят девятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с между-народным участием. Ярославль: сб. материалов конф. [Электронный ресурс]. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2016, С. 834-837 – 1 электрон. опт. диск (CDROM). - ISBN 978-5-9914-0524-9

91. Медовар Б.И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1966. – 284 с.

92. 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 / Старооскольский Технологический Институт НИТУ МИСиС, Старый Оскол, 2015, - С. 244-249.

93. Желтов Ю.В., Тузов М.П., Соколов Л.Д.О возможных причинах ускорения диффузии при циклической термообработке гетерогенных систем. – Известия высших учебных заведений. Физика. 1972. № 2. С. 22-25.

94. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М.: ИЛ, 1955, 312с.

95. Созыкина А.С. Моделирование превращений при аустенитизации и закалке и прогнозирование твердости высокохромистых сталей и чугунов на основе термодинамических и кинетических расчётов: дис. … канд. тех. наук. Челябинск, 2018. 153 с.

96. Нейгебауэр Г. О., Фельдман Б. А., Носкова В. Ф., Сергеев В. П. Влияние азота и редкоземельных металлов на термостойкость хромистых сплавов. – Литейное производство. 1972. №7. С. 24-25.

97. Дуб В. А. Разработка основ технологии создания жаропрочных сплавов на основе сложнолегированных хромистых сталей: Дис… канд. тех. наук. – М., 2011. – 149 с.

98. Chandra T.,Wanderka N.,Reimers W., Ionescu M. Microstructure Evolution in 3%Co Modified P911 Heat Resistant Steel under Creep Conditions // Advanced Materials Research. 2010. V. 89 – 91. – P. 295-300.

99. Bannych O.A., Blinov V. M., Kostina M. V. Effect of nitrogen as an alloying element on the ecological properties of iron based alloys. In: Japan – Russia Advanced Science and Technology Exchange Promotion Forum. Tokyo. 2000. Bookofabstracts.,P. 92 – 103.

100. Банных О. А., Блинов В. М., Костина М. В. О проблемах рационального использования азота для легирования сплавов на основе железа. – Сб. трудов Международной научно-технической конференции «Современные материалы и их использование в технике». С-Петербург, 2001, С. 3-5.

101. Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V., Karpman M.G., Chervyakov A.V., Dymov A.V. On the possibility of using high-strength corrosion-resistant austenitic cr-n-bearing steels for surgical implants // Russian metallurgy (Metally). 2002. № 3. P. 301-307.

102. Регина Л. Г., Васильева Я. М., Дуб В. С. И др. Легированиесталейазотом. Электрометаллургия. – 2005. - № 2. –С. 14-19.

103. Torkhov G. F., Latash Y. V., Fessler R. R. Development of melting and thermomechanical – processing parameters for a high-nitrogen stainless steel prepared by plasma – arc remelting. // Journal of Metalls. – 1978. – Vol. 30. – P. 20-27.

104. Abe F., Taneike1 M., Sawada K. Alloy design of creep resistant 9Cr steel using a dispersion of nano-sized carbonitrides // International Journal of Pressure Vessels and Piping. Volume 84, Issues 1–2. 2007. P. 3-12

105. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. М.: -Металлургия, -1978. – 248 с.

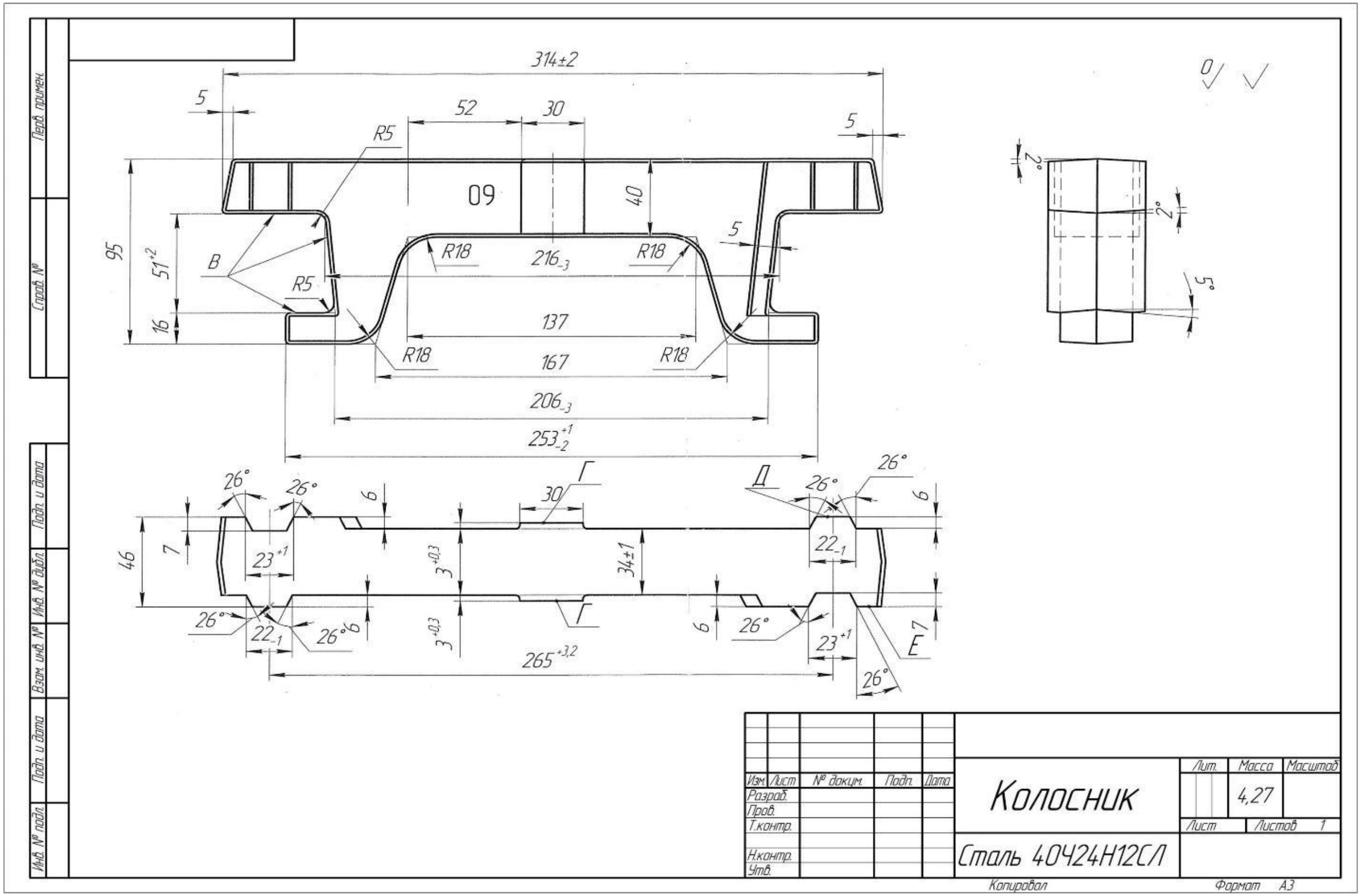
106. Гольдштейн М.И., Попов В.В. Растворимость фаз внедрения при термической обработке стали, М.: Металлургия, 1989. -200 с.

107. Иодковский С. А. Некоторые теоритические и технологические вопросы рафинирования высоколегированных сталей. – Дис. канд. тех. наук. – М.: НПО ЦНИИТМАШБ 1966, 131 С.

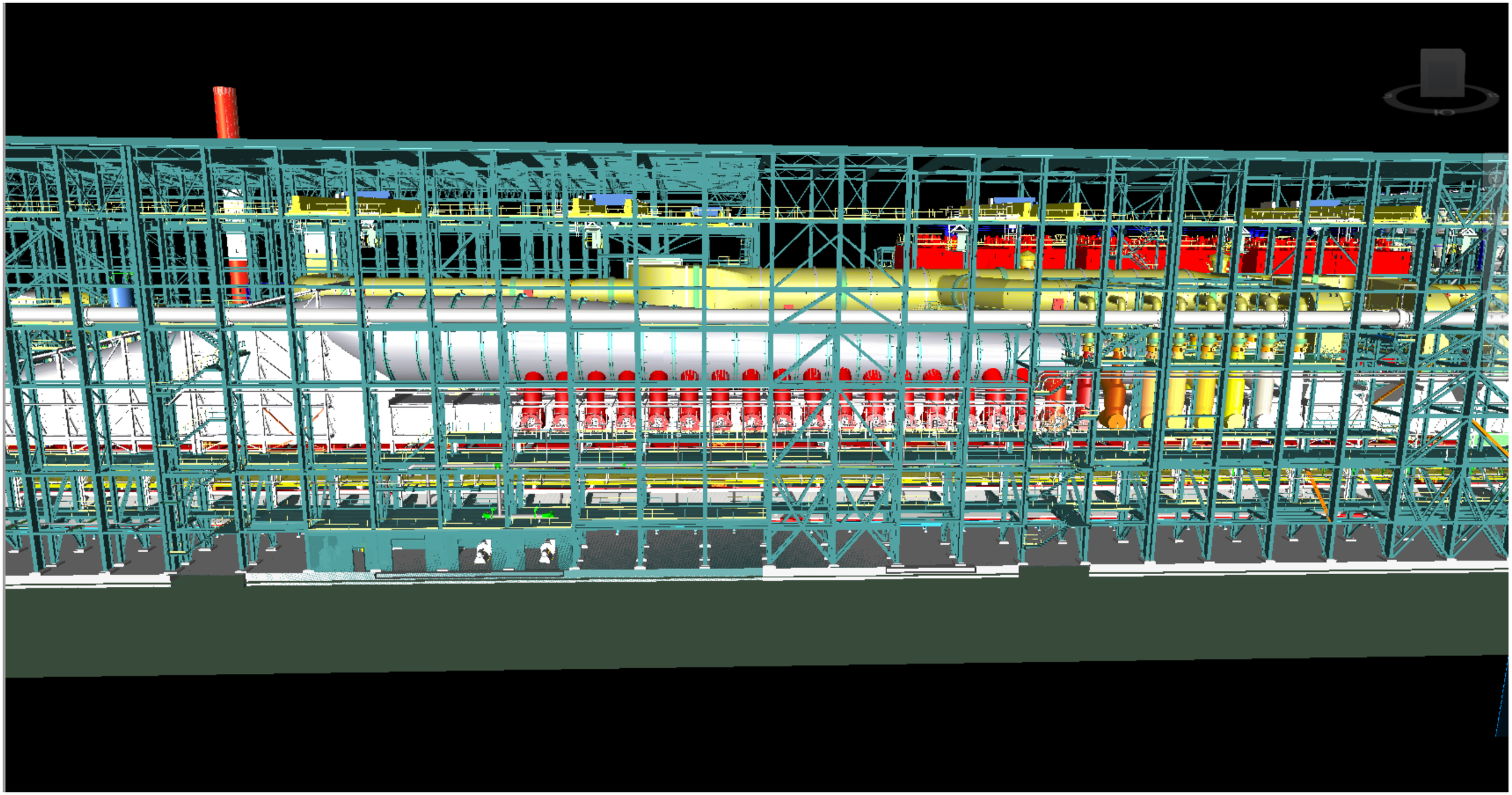
108. Lundin. L., Faellman S., Andren H. O. Microstructure and mechanical properties of 10% chromium steel with improved creep resistance at 600°C // Materials Science and Technology. – Vol.13. – March 1997. – P. 233-242.

109. 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.

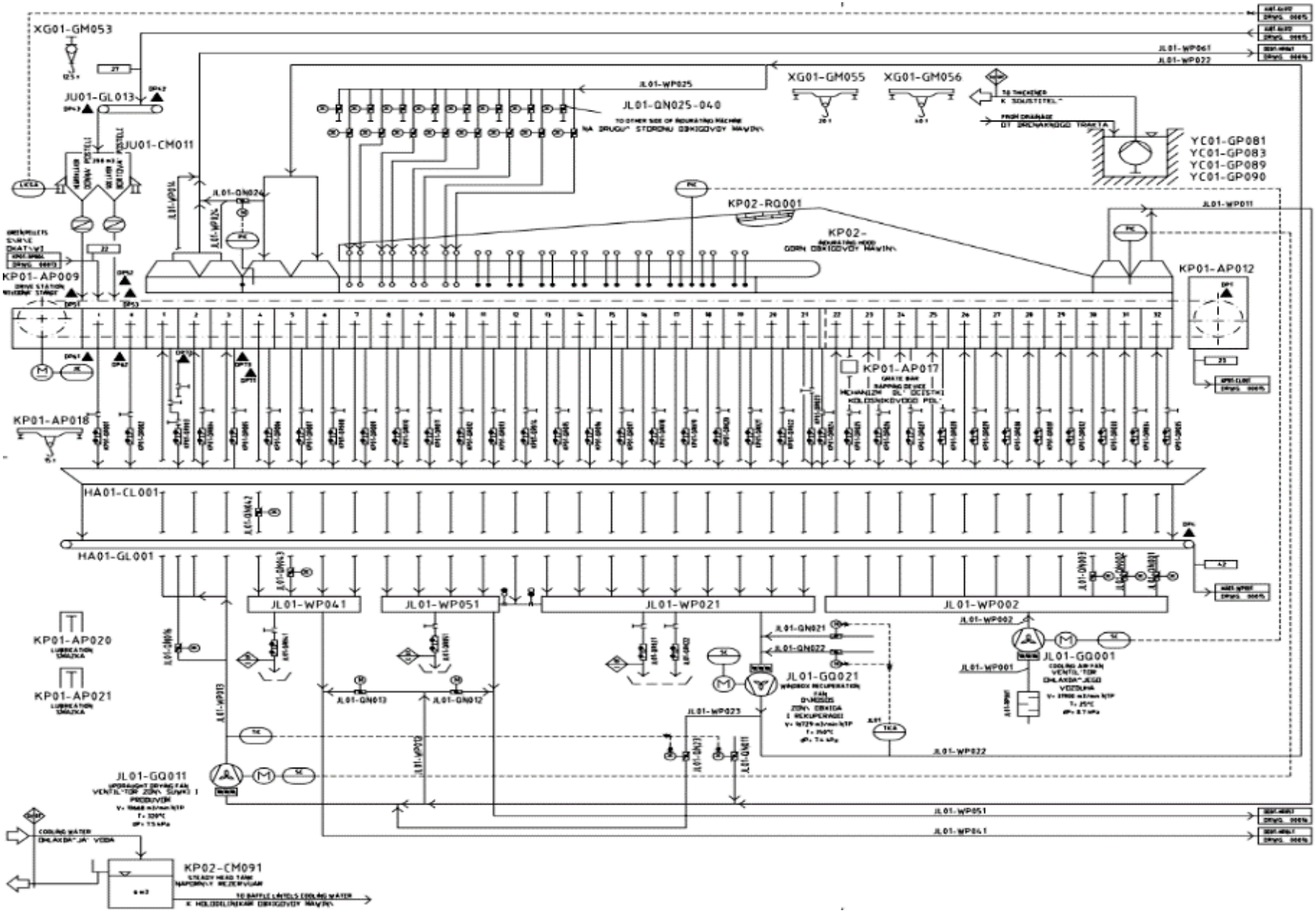
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Чертеж отечественного колосника из стали 40Х24Н12СЛ



ПРИЛОЖЕНИЕ 2. 3-D вид обжиговой машины OUTOTEC АО «Стойленский ГОК»



ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Технологическая схема обжиговой машины OUTOTEC АО «Стойленский ГОК»



ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Рабочий план проведения промышленных испытаний колосников на АО «Стойленский ГОК»

Группа НЛМК
Открытое акционерное общество
"Стойленский горно-обогатительный комбинат"

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
_____ С.А. Напольских
" 18 " 01 2018 г.

РАБОЧИЙ ПЛАН № 26/20.02-18
проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК.

Цель работы: Определение срока службы колосников производства компании ОАО «Череповецкий литейно-механический завод»
Основание для проведения работы: Предложение о поставке от ОАО «ЧЛМЗ» №686/ОП от 14.12.2017 г. на запрос №26/4.00-1462 от 08.12.2017 г.
Руководители работы: Кононыхин А.В. (начальник ФОК).
Ответственные исполнители: Иванов Д.И. (начальник смены ФОК), Рыжков А.В. (ведущий специалист ФОК), Клюев А.М. (начальник управления по закупкам), А.П. Катаев (начальник ТО ФОК), В.В. Евтушенко (начальник участка ОиО ФОК), А.А. Назаренко (начальник ЦТОиР ФОК РК), А.С. Замараев (главный специалист УЭ).

№ п/п	Наименование этапа работы	Содержание работы	Срок исполнения	Исполнители
1	Подготовка к испытаниям	1.1 Создать ОЗМ для экспериментального колосника (заявка на присвоение ОЗМ № 617339).	Декабрь 2017	А.В. Рыжков, Д.И. Иванов
		1.2 Внести в потребность экспериментальные колосники (РР-заказы или ТОРО-заказы) для возможности заключения контракта на поставку экспериментальной партии.	Январь 2018	А.В. Кононыхин, Д.И. Иванов
		1.3 Заключение договора на поставку экспериментальной партии колосников. В договоре указать спец. требования к партии (ресурс эксплуатации, качество отливки).	Февраль 2018	А.М. Клюев, Д.И. Иванов
		1.4 Изготовление и поставка 400 шт. экспериментальных колосников от ОАО «ЧЛМЗ». Согласно предложению ОАО «ЧЛМЗ» срок поставки и изготовления до 2-х мес.	Март - апрель 2018	ОАО «ЧЛМЗ»

		1.5 Произвести входной контроль колосников с составлением акта. Основные параметры соответствия: геометрические размеры, вес, качество поверхности и уклонов, поверхностные литейные дефекты (пригары, поры, раковины).	В течении недели после п. 1.4.	Д.И. Иванов, А.П. Катаев
2	Лабораторные испытания	2.1 После поставки провести лабораторные испытания для определения скрытых дефектов отливки (разрушаемый анализ).	Май 2018	Д.И. Иванов
		2.2 Составить отчет о качестве поставленной детали: отсутствие/наличие скрытых дефектов литья, качественная/ некачественная термообработка после литья, соответствие/не соответствие химического состава заявленному.	Май 2018	Д.И. Иванов, А.П. Катаев
3	Начало испытаний	3.1 Смонтировать колосники экспериментальной партии на обжиговую тележку, установить на обжиговую машину.	Май - июнь 2018	А.А. Назаренко, В.В. Евтушенко
		3.2 Составить акт об установке колосников экспериментальной партии на обжиговую машину и начале испытаний. Копию акта направить в УОЭ.	Май - июнь 2018	Д.И. Иванов, А.П. Катаев
4	Испытание	4.1 Осуществлять контроль за работой экспериментальной обжиговой тележки в ходе эксплуатации. Любые вмешательства и ремонты колосникового поля осуществлять с составлением акта об их выполнении (замены колосников, ремонты колосникового поля). Копии актов направить в УОЭ.	В период испытаний (2018 – 2019 гг.)	Д.И. Иванов, А.П. Катаев, В.В. Евтушенко
		4.2 Составлять акты о качестве экспериментальных колосников каждый месяц с момента выполнения п. 3.1 на протяжении всего срока испытаний (24 месяца). В акт включать: состояние колосникового поля, причины отклонений и выбраковок (количественный анализ эксплуатационного ресурса), текущий срок эксплуатации, выборку по замерам геометрии и веса. Копии актов направить в УОЭ. Также к ежемесячному акту прилагать фотоматериалы : -общего вида обжиговой тележки с экспериментальными колосниками, -вида 3-5 колосников с максимальным приближением по всем четырем рядам колосников.	В период испытаний (2018 – 2019 гг.)	Д.И. Иванов, А.П. Катаев
5	Подведение итогов испытаний от использования опытной продукции	5.1 По результатам испытаний предоставить в УЭ информацию для расчета экономической эффективности от использования экспериментальных колосников.	3 недели после п.4.2	Д.И. Иванов, А.П. Катаев
		5.2 На основании полученной информации (п.4.1) подготовить справку с оценкой экономической эффективности. Копию справки предоставить на ФОК и УОЭ.	2 недели после п.5.1	А.В. Замараев
		5.3 При получении положительных результатов испытаний, вынести их на технический совет СГОК для определения решения о дальнейшем использовании.	10 дней после п.5.2	УОЭ

И.о. начальника УОЭ **Иванникова Т.Г.**

Лист согласования к рабочему плану по проведению опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК.

СОГЛАСОВАНО:

№ п.п.	Должность	Результат согласования	ФИО
1	Директор технической дирекции «10» января 2018	*согласовано*	А.В. Щербаков
2	Директор РК «17» января 2018	*согласовано*	С.Н. Серёгин
3	Начальник ФОК «10» января 2018	*согласовано*	А.В. Кононыхин
4	Начальник УЗ «29» декабря 2017	*согласовано*	А.М. Клюев
5	Начальник УЭ «10» января 2018	*согласовано*	А.Л. Мязин
6	Начальник ЦТОиР ФОК РК «15» января 2018	*согласовано*	А.А. Назаренко

Достоверность данных подтверждаю:

И.о. начальника УОЭ _____ Т.Г. Иванникова

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Спецификация на партию экспериментальных колосников, поставленных для промышленных испытаний

НЛМК Регистр. № 768

рег. № 768/18

№ договора SAP 100000000000259036
Спецификация 4100049197 Стр. 1 из 2

СПЕЦИФИКАЦИЯ 4100049197 от/dated 21.06.2018
количественная

Поставщик / Seller

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "ЧЕРЕПОВЕЦКИЙ ЛИТЕЙНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД"

Адрес / Address: 162627, РФ, Вологодская область, ЧЕРЕПОВЕЦ Г, СТРОЙИНДУСТРИИ УЛ 12

Код поставщика/ Code of Seller 1000025846

Контактное лицо / Contact person: Федоров Александр Игоревич

Контактная информация / Contact info

+7-8202-20-28-57

действуют с 09.07.2018
по 31.12.2018
К договору № 768
от 04.07.2018 г.

SPECIFICATION 4100049197
quantitative

To Contract № 768
dated 04.07.2018

valid from 09.07.2018
Until 31.12.2018

Покупатель / Buyer

Открытое акционерное общество "Стойленский горно-обогатительный комбинат"(ОАО "Стойленский ГОК") / JSC «Stoilensky GOK»

Адрес / Address: 309500, РФ, Белгородская обл., г. Старый Оскол, Юго-западный промрайон, площадка Фабричная проезд - 4 / 309500, RU, Stary Oskol, south-west i, Stary Oskol, south-west industrial area, Fabric site,

Контактное лицо / Contact person: Анна Пивень

Факс / Fax: нет

Телефон / Phone: +7(4725)416236

E-mail: PIVEN_AR@NLMK.COM

Группа закупки / Purchasing group F17

Тендер SRM / SRM Tender: 2000058373

№	Код ОЗМ / Code of material	Наименование товара / Name of material	Кол-во по договору / Q-ty as per Contract	Ед. измерения / UoM	Цена за единицу (без НДС) в валюте / Price for UoM (w/o VAT) in currency	Валюта договора / Contract currency	За / For	Ед. измерения цены / UoM price	Сумма (без НДС) / Amount (w/o VAT)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	713596	Колосник 154.05981 60 календарных дней с момента подписания договора и спецфикации	400	шт	1 920,00	RUB	1	шт	**768 000,00**
		Итого сумма без НДС / Total amount w/o VAT:							768 000,00

НЛМК Регистр. № 768

№ договора SAP 100000000000259036
Спецификация 4100049197 Стр. 2 из 2

№	Код ОЗМ / Code of material	Наименование товара / Name of material	Кол-во по договору / Q-ty as per Contract	Ед. измерения / UoM	Цена за единицу (без НДС) в валюте / Price for UoM (w/o VAT) in currency	Валюта договора / Contract currency	За / For	Ед. измерения цены / UoM price	Сумма (без НДС) / Amount (w/o VAT)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Итого сумма НДС (18 %) / Total VAT:							138 240,00
		Итого общая сумма с НДС / Total amount with VAT:							906 240,00

1. Условия поставки (Инкотермс - 2010) / Delivery conditions (Incoterms-2010): DDP г. Старый Оскол

2. Условия платежа / Payment terms: D165 Постоплата FCR 60 дней

С даты поставки

3. Срок поставки / Delivery terms:

60 календарных дней с момента подписания договора и спецфикации

4. Дополнительные условия / Additional agreements:

1. Продукция изготавливается в соответствии с чертежом 154.05981Б; 2. Отливка по СТО 411000-2-2009 "Отливки из сталей сплавов и чугунов"; 3. Материал: 40Х24Н12СЛ, хим. состав согласно Приложению №1 к настоящей спецификации; 4. Будет выполнена термообработка согласно Приложению №1 к настоящей спецификации.

5. Завод изготовитель/год выпуска / Manufacturer / Production year:

ОАО "ЧЛМЗ"

ПОСТАВЩИК / SUPPLIER
М.П.
Генеральный директор ОАО "ЧЛМЗ"
Богданович
подпись / signature ФИО / Name, Surname
Печать/Stamp

ПОКУПАТЕЛЬ / BUYER
М.П.
подпись / signature
Начальник управления по закупкам
Клюев А.М.
ФИО / Name, Surname
Печать/Stamp

Начальник ОЛЗ
Дивенко А.Р.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Письмо-справка от ОАО «ЧЛМЗ» об источнике экспериментальной технологии

ОАО «Череповецкий литейно – механический завод»
162600, РФ, Вологодская обл., г. Череповец, ул. Стройиндустрии 12,
тел./факс:(8202) 20–28–38. E–mail: chlmz@chlmz.ru http://www.chlmz.ru

Исх. №541/оп от 06.09.18 г.

По месту требования

СПРАВКА

Настоящим ОАО «ЧЛМЗ» подтверждает, что технология изготовления опытной партии колосников обжиговых тележек (отраженная в приложении 1 к спецификации 768/18 от 27.07.2018) для промышленный испытаний на ФОК ОАО «Стойленский ГОК», была предоставлена ответственным за проведение промышленных испытаний на ФОК – Ивановым Денисом Игоревичем.

Маркетинг-директор С.Н. Куликов

Вологодская область. Открытое акционерное общество "Череповецкий литейно-механический завод" г. Череповец

Исп: Федоров А.И
Тел: (8202) 20-28-57
E-mail: fedorov@chlmz.ru

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Акт входного контроля колосников АО «СГОК»

Группа НЛМК

Открытое акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Фабрики Окомкования

ОАО «Стойленский ГОК»

_____ А.В. Кононыхин

«11» октября 2018 г.

АКТ

Входного контроля колосников экспериментальной партии
изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

Начальник участка окомкования и обжига: Евтушенко В.В;
Начальник участка ЦТОиР РК ФОК: Маматов Д.А;
Начальник ТО ФОК: Катаев А.П;
Начальник смены, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И;
Ведущий специалист участка окомкования и обжига: Кильянов А.В.

Составила настоящий акт входного контроля колосников экспериментальной партии изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Изготовленных для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

1. Входной **не разрушающий** контроль был осуществлён выборочным методом: из разных ящиков случайным образом извлекли 3 шт. колосника и выполнили замеры: массы, геометрических размеров, качества поверхности (см. табл. 1).

Качество поверхности оценено экспертно. На поверхности колосников отсутствуют раковины и другие пустоты, спаи, плены, утяжины, ужимины, пригары, трещины и другие видимые дефекты. Количество неровностей на поверхности колосников глубже 2 мм – не

превышает 10-и шт. на 1-у деталь. Места от прибылей обработаны вровень с основной поверхностью.

Талица 1: Замеры массы и геометрических размеров рабочей части колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ

№ п/п	№ детали	№ детали в партии	Вес, кг	Замеры ширины рабочей части колосника, мм			Замеры высоты рабочей части колосника, мм		
				Начала	Середины	Конца	Начала	Середины	Конца
1	47480	397	4,055	32,3	32,5	32,1	38,7	40,9	39,1
2	47455	378	4,075	32,4	32,6	32,3	38,6	41,0	38,3
3	47455	384	4,140	33,0	32,5	33,0	39,1	40,9	39,0

Допуски размеров соответствуют ГОСТ 3212-92, точность отливки по ГОСТ 26645-85 соответствует 6-му классу точности, точность отливки соответствует ГОСТ Р 53464-2009 (точность и отклонение размеров отливки).

2. Входной **разрушаемый** контроль был выполнен на детали № 47480, № детали в партии 386. Разрушаемый контроль разделен на 3-и части:

2.1 макроанализ для определения качества литейных параметров (температура разливки стали, достаточность и правильность расположения прибылей) – выполнен ниже (см. рис. 1 и 2),

2.2 анализ химического состава детали, что в первую очередь необходимо для определения параметра жаростойкости (соотношение содержаний хрома и никеля) и определения способности стали сопротивляться межкристаллитной коррозии (соотношение содержаний углерода и хрома) – см. приложение 1,

2.3 лабораторный микроанализ для определения качества параметров термообработки и литья (выполняется отдельным актом и представляется отдельно).

2.1 Для выполнения макроанализа деталь была разрезана на 5-ть частей для исключения возможности деформации поверхности среза и механического «ужатия» усадочных раковин (см. рис. 1).

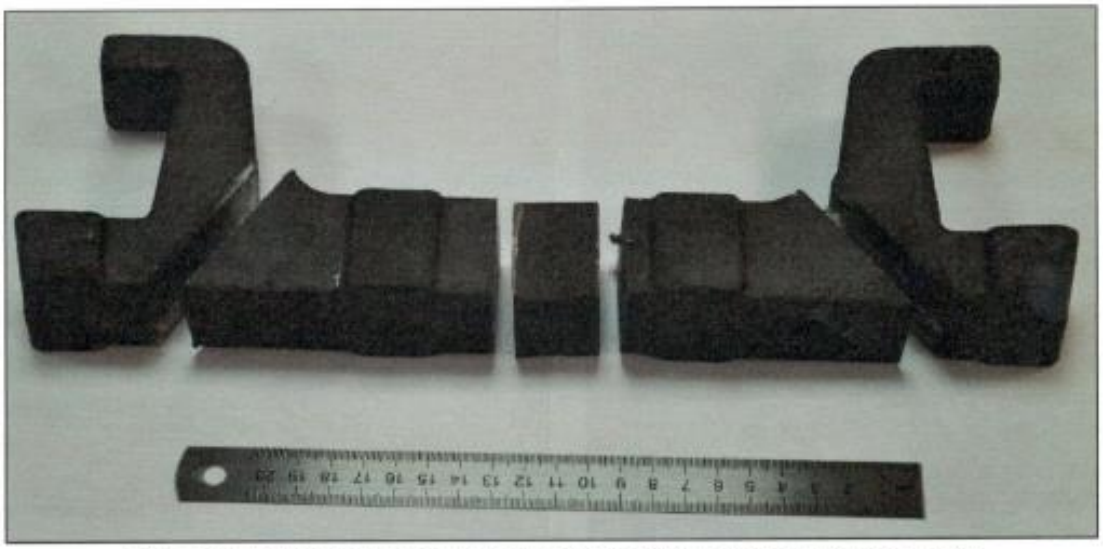


Рис. 1. Фото разрезанного на 5-ть частей колосника для макроанализа

Разрезы колосника были выполнены в участках наибольшего риска появления усадочных раковин: вдоль самых массивных частей детали и вдоль расположения литейных прибылей.

Макроанализ разрезов показал, что в колоснике отсутствуют усадочные раковины (см. рис. 2), что свидетельствует о достаточном качестве параметров технологии разливки стали (нет перегревов металла при разливке, достаточное количество прибылей и корректность их расположения).

Рис. 2. Фото поверхностей разреза колосника под разными углами

2.2 Химический анализ был выполнен в промышленной Лаборатории по контролю производства ДЦ-1 и ФЛЦ ПАО «НЛМК» г. Липецк (см. приложение 1).

Результаты химического анализа показали: химический состав детали соответствует требованиям ГОСТ 977-88 с незначительными отклонениями по содержанию хрома (с учетом погрешности измерения и допуска по ГОСТ – этот показатель можно считать достигнутым).

Учитывая специальные требования Заказчика (ОАО «Стойленский ГОК»), изложенные в приложении 1 к договору поставки 00768 от 04.07.2018 – содержание углерода не должно быть ниже 0,28%, в стали – 0,23% (что соответствует ГОСТ 977-88). С учетом погрешности измерения данный параметр считается достигнутым.

Решение комиссии: по результатам анализов (не разрушаемого контроля, химического состава и макроанализа) установлено следующее:

✓ Допуски размеров соответствуют ГОСТ 3212-92, точность отливки по ГОСТ 26645-85 соответствует 6-му классу точности, точность отливки соответствует ГОСТ Р 53464-2009 (точность и отклонение размеров отливки).

✓ Макроанализ разрезов показал, что в колоснике отсутствуют усадочные раковины (см. рис. 2), что свидетельствует о достаточном качестве параметров технологии разливки стали (нет перегревов металла при разливке, достаточное количество прибылей и корректность их расположения).

В результате выполненного входного контроля сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников удовлетворяет требованиям Заказчика со следующими оговорками:

1. Результаты химического анализа считаются удовлетворительными со следующими выводами: при заключении договора поставки необходимо предусмотреть штрафные санкции для завода изготовителя (Исполнителя – ОАО «ЧЛМЗ») при нарушении требований химического состава от Заказчика, изложенных в приложении 1 к договору поставки 00768 от 04.07.2018.

2. Для определения качества параметров термообработки и литья необходимо провести лабораторный микроанализ структуры детали.

3. При заключении договора поставки с испытуемым поставщиком необходимо предусмотреть изменение геометрии колосников под типовой чертёж Заказчика.

Подписи:

Евтушенко В.В. _____ (подпись)

Маматов Д.А. _____ (подпись)

Катаев А.П. _____ (подпись)

Иванов Д.И. _____ (подпись)

Кильянов А.В. _____ (подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Акт химического анализа опытных колосников, выполненного на АО «СГОК»

Приложение 1. Протокол химического анализа колосников ОТ

Форма 107-0

Свидетельство № 075 от 11.11.2016 г о состоянии измерений в лаборатории	ПАО "НЛМК" Цех Центральная лаборатория комбината	Лаборатория по контролю производства ДЦ-1 и ФЛЦ тел. 44-61-32
г. Липецк, пл. Металлургов, 2		

ПРОТОКОЛ № 1539/230 ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Заявка № **230** от **04.12.2018**

Дата выдачи протокола: **04.12.2018**

Заказчик:
ФЛЦ

№ проб	№ заказа	№ чертежа	Наименование материала	Марка материала по технической документации	Нормативный документ на марку материала	№ плавки	Результаты анализа, %													
							C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V			
1			Колосник ОАО "ЧЛМЗ", ОЗМ 713596	40Х24Н12С2М			0,23	0,70	0,494	0,013	0,018	21,11	11,13	0,171	0,46	<0,01	0,055			

Лаборатория не несет ответственность за отбор проб.
Результаты испытаний касаются только образцов, подвергнутых испытаниям.
Сведения, содержащиеся в данном протоколе относительно маркировки проб, основываются на представленной заказчиком информации. Перепечатка протокола без разрешения испытательной лаборатории запрещена.
Воспроизведение данного протокола разрешается только в форме фотографического факсимиле.

Лист: 1

Всего листов: 1

Исполнитель Лукина С.И. Бабушкина Е.И.

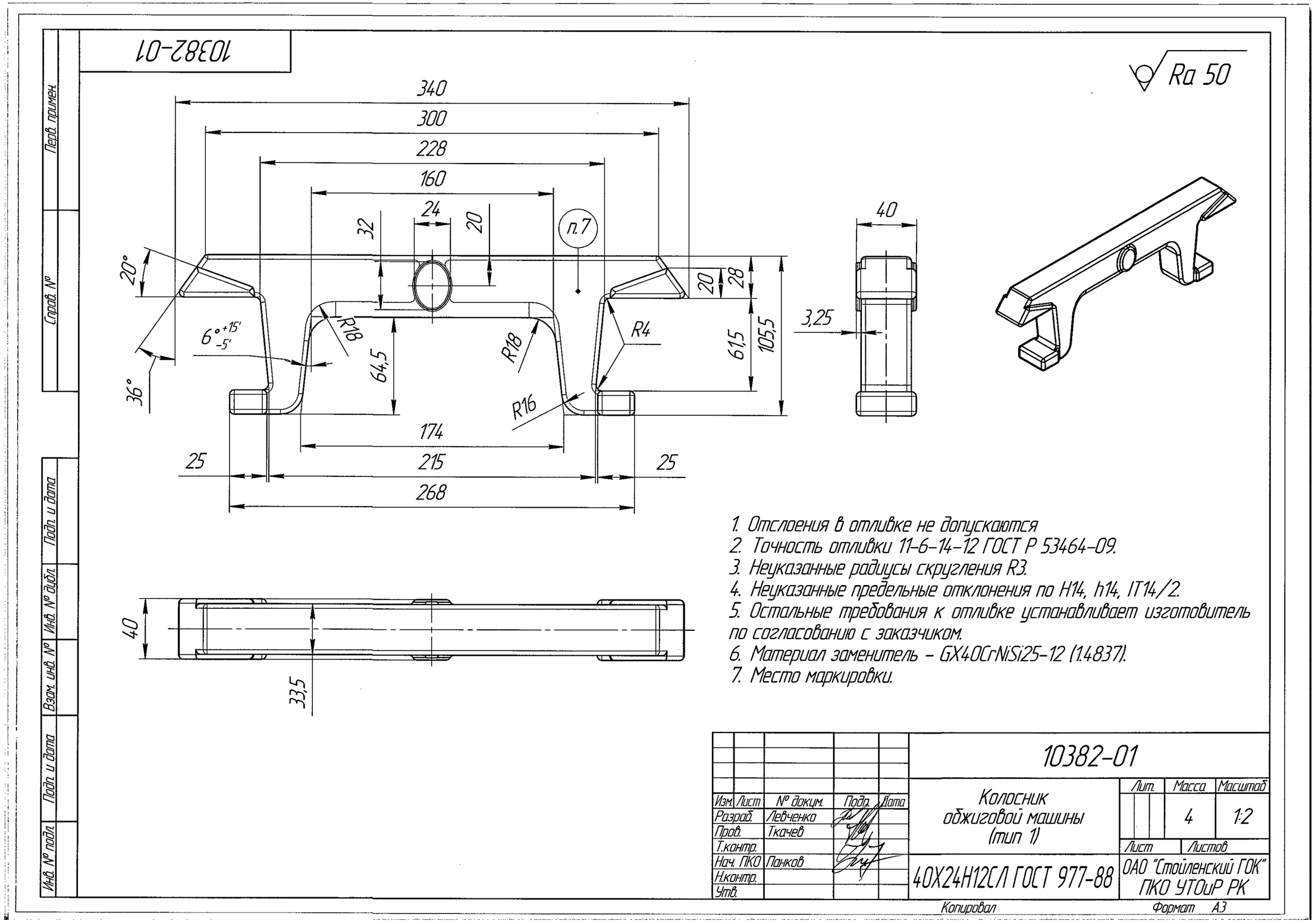
Виза:* Начальник лаборатории Пеннер Е.А.

Руководитель: Начальник отдела по технологиям аналитических испытаний цеха ЦЛК Мерзликина О.Г. "___"_____20___ г

дата печати протокола 05.12.18

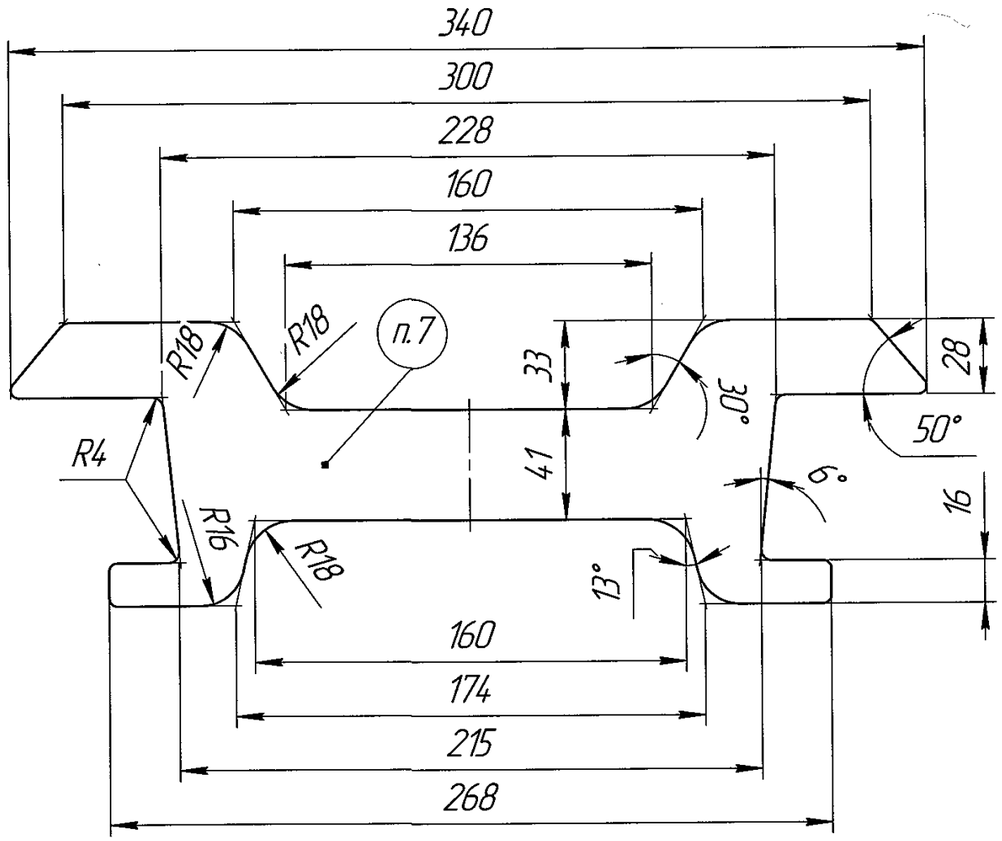
* - если необходимо

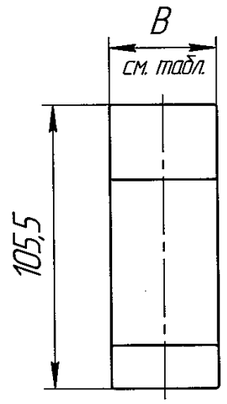
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Чертежи колосников OUTOTEC, применяемых на АО «Стойленский ГОК»

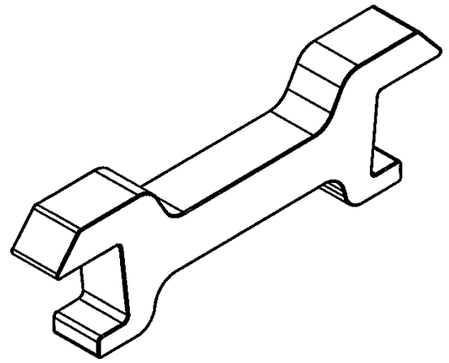


10382-02

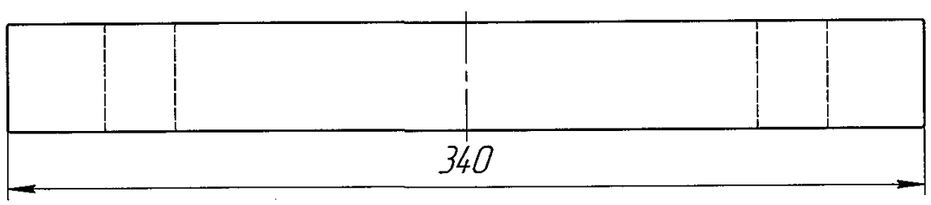
Ra 50







1. Отслоения в отливке не допускаются
2. Точность отливки 11-6-14-12 ГОСТ Р 53464-09.
3. Неуказанные радиусы скругления R3.
4. Неуказанные предельные отклонения по H14, h14, IT14/2.
5. Остальные требования к отливке устанавливает изготовитель по согласованию с заказчиком.
6. Материал заменитель – GX40CrNiSi25-12 (1.4837).
7. Место маркировки.



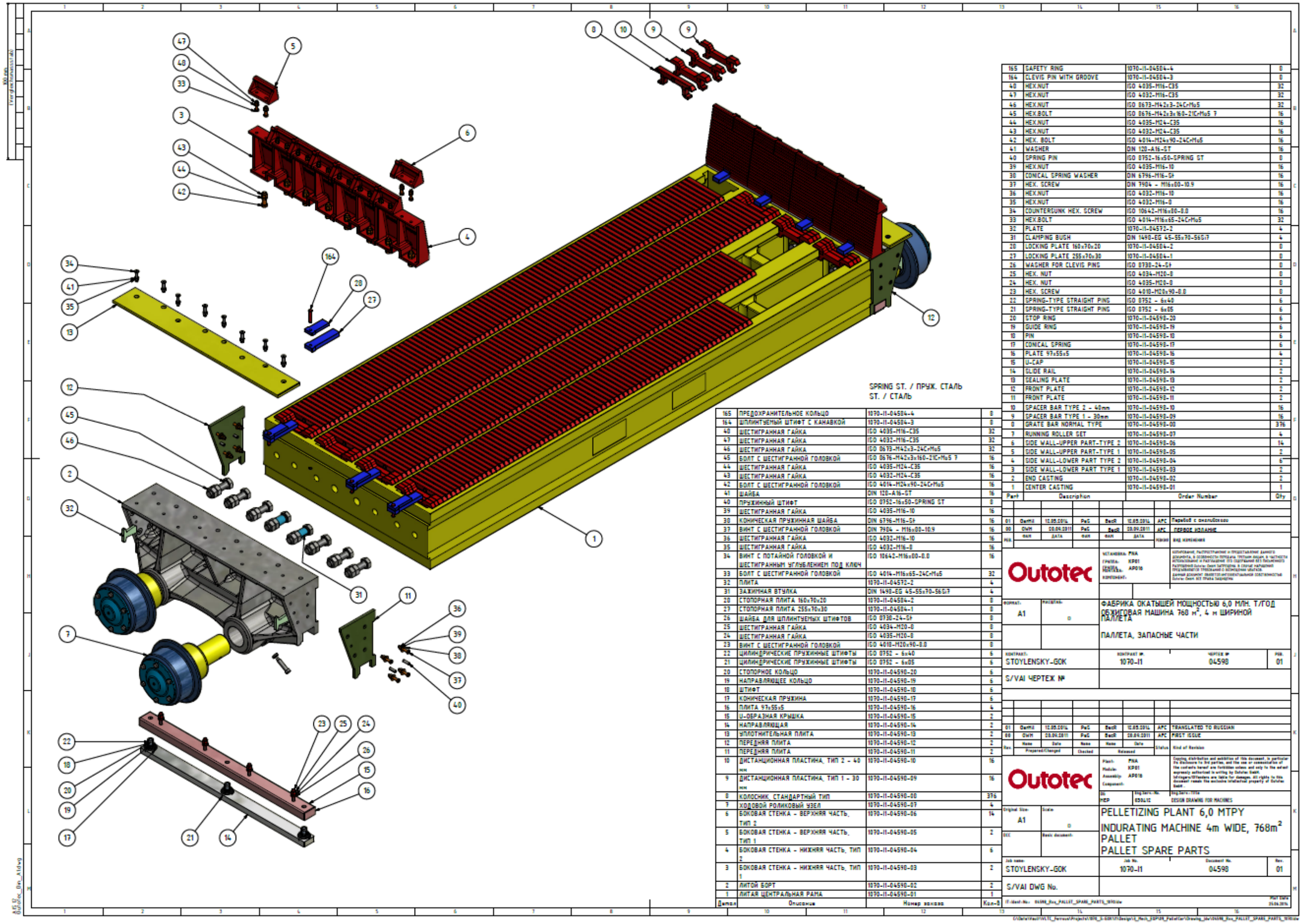
Формат	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол	Масса,ед
А3		10382-02.02	Колосник обжиговой машины B=40	1	4,9 кг
А3		10382-02.01	Колосник обжиговой машины B=30	1	3,7 кг

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Левченко			10382-02			
Пров.		Ткачев			Колосник обжиговой машины тип 2	Лит.	Масса	Масштаб 1:2
Т.контр.						Лист	Листов	
Нач. ПКО		Панков			40Х24Н12СЛ ГОСТ 977-88	ОАО "Стойленский ГОК" ПКО УТОиР РК		
Н.контр.								
Утв.								

Перв. примен. | Справ. № | Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл.

Копировал | Формат А3

ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Общий компоновочный чертеж обжиговой тележки АО «Стойленский ГОК»



Part	Description	Order Number	Qty
165	SAFETY RING	1070-11-04584-4	8
164	CLEVIS PIN WITH GROOVE	1070-11-04584-3	8
48	HEX.NUT	ISO 4035-M16-C35	32
47	HEX.NUT	ISO 4032-M16-C35	32
46	HEX.NUT	ISO 8673-M42x3-24CrMo5	32
45	HEX.BOLT	ISO 8676-M42x3x160-21CrMo5 7	16
44	HEX.NUT	ISO 4035-M24-C35	16
43	HEX.NUT	ISO 4032-M24-C35	16
42	HEX. BOLT	ISO 4014-M24x90-24CrMo5	16
41	WASHER	DIN 128-A16-ST	16
40	SPRING PIN	ISO 8752-16x50-SPRING ST	8
39	HEX.NUT	ISO 4035-M16-10	16
38	CONICAL SPRING WASHER	DIN 6796-M16-St	16
37	HEX. SCREW	DIN 7984 - M16x80-10.9	16
36	HEX.NUT	ISO 4032-M16-10	16
35	HEX.NUT	ISO 4032-M16-8	16
34	COUNTERSUNK HEX. SCREW	ISO 10642-M16x80-8.8	16
33	HEX.BOLT	ISO 4014-M16x65-24CrMo5	32
32	PLATE	1070-11-04572-2	4
31	CLAMPING BUSH	DIN 1498-EG 45-55x70-56Si7	4
28	LOCKING PLATE 160x70x20	1070-11-04584-2	8
27	LOCKING PLATE 255x70x30	1070-11-04584-1	8
26	WASHER FOR CLEVIS PING	ISO 8738-24-St	8
25	HEX. NUT	ISO 4034-M20-8	8
24	HEX. NUT	ISO 4035-M20-8	8
23	HEX. SCREW	ISO 4018-M20x90-8.8	8
22	SPRING-TYPE STRAIGHT PING	ISO 8752 - 6x40	6
21	SPRING-TYPE STRAIGHT PING	ISO 8752 - 6x85	6
20	STOP RING	1070-11-04598-20	6
19	GUIDE RING	1070-11-04598-19	6
18	PIN	1070-11-04598-18	6
17	CONICAL SPRING	1070-11-04598-17	6
16	PLATE 97x55x5	1070-11-04598-16	4
15	U-CAP	1070-11-04598-15	2
14	SLIDE RAIL	1070-11-04598-14	2
13	SEALING PLATE	1070-11-04598-13	2
12	FRONT PLATE	1070-11-04598-12	2
11	FRONT PLATE	1070-11-04598-11	2
10	SPACER BAR TYPE 2 - 40mm	1070-11-04598-10	16
9	SPACER BAR TYPE 1 - 30mm	1070-11-04598-09	16
8	GRATE BAR NORMAL TYPE	1070-11-04598-08	376
7	RUNNING ROLLER SET	1070-11-04598-07	4
6	SIDE WALL-UPPER PART-TYPE 2	1070-11-04598-06	14
5	SIDE WALL-UPPER PART-TYPE 1	1070-11-04598-05	2
4	SIDE WALL-LOWER PART TYPE 2	1070-11-04598-04	6
3	SIDE WALL-LOWER PART TYPE 1	1070-11-04598-03	2
2	END CASTING	1070-11-04598-02	2
1	CENTER CASTING	1070-11-04598-01	1

Дата	Описание	Номер заказа	Кол-в
165	ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО	1070-11-04584-4	8
164	ШПЛИНТУЕМЫЙ ШТИФТ С КАНАВКОЙ	1070-11-04584-3	8
48	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 4035-M16-C35	32
47	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 4032-M16-C35	32
46	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 8673-M42x3-24CrMo5	32
45	БОЛТ С ШЕСТИГРАННОЙ ГОЛОВКОЙ	ISO 8676-M42x3x160-21CrMo5 7	16
44	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 4035-M24-C35	16
43	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 4032-M24-C35	16
42	БОЛТ С ШЕСТИГРАННОЙ ГОЛОВКОЙ	ISO 4014-M24x90-24CrMo5	16
41	ШАЙБА	DIN 128-A16-ST	16
40	ПРУЖИННЫЙ ШТИФТ	ISO 8752-16x50-SPRING ST	8
39	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 4035-M16-10	16
38	КОНИЧЕСКАЯ ПРУЖИННАЯ ШАЙБА	DIN 6796-M16-St	16
37	ВИНТ С ШЕСТИГРАННОЙ ГОЛОВКОЙ	DIN 7984 - M16x80-10.9	16
36	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 4032-M16-10	16
35	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 4032-M16-8	16
34	ВИНТ С ПОТАЙНОЙ ГОЛОВКОЙ И ШЕСТИГРАННЫМ УГЛУБЛЕНИЕМ ПОД КЛЮЧ	ISO 10642-M16x80-8.8	16
33	БОЛТ С ШЕСТИГРАННОЙ ГОЛОВКОЙ	ISO 4014-M16x65-24CrMo5	32
32	ПЛИТА	1070-11-04572-2	4
31	ЗАЖИМНАЯ ВТУЛКА	DIN 1498-EG 45-55x70-56Si7	4
28	СТОПОРНАЯ ПЛИТА 160x70x20	1070-11-04584-2	8
27	СТОПОРНАЯ ПЛИТА 255x70x30	1070-11-04584-1	8
26	ШАЙБА ДЛЯ ШПЛИНТУЕМЫХ ШТИФТОВ	ISO 8738-24-St	8
25	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 4034-M20-8	8
24	ШЕСТИГРАННАЯ ГАЙКА	ISO 4035-M20-8	8
23	ВИНТ С ШЕСТИГРАННОЙ ГОЛОВКОЙ	ISO 4018-M20x90-8.8	8
22	ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПРУЖИННЫЕ ШТИФТЫ	ISO 8752 - 6x40	6
21	ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПРУЖИННЫЕ ШТИФТЫ	ISO 8752 - 6x85	6
20	СТОПОРНОЕ КОЛЬЦО	1070-11-04598-20	6
19	НАПРАВЛЯЮЩЕЕ КОЛЬЦО	1070-11-04598-19	6
18	ШТИФТ	1070-11-04598-18	6
17	КОНИЧЕСКАЯ ПРУЖИНА	1070-11-04598-17	6
16	ПЛИТА 97x55x5	1070-11-04598-16	4
15	U-ОБРАЗНАЯ КРЫШКА	1070-11-04598-15	2
14	НАПРАВЛЯЮЩАЯ	1070-11-04598-14	2
13	УПЛОТНИТЕЛЬНАЯ ПЛИТА	1070-11-04598-13	2
12	ПЕРЕДНЯЯ ПЛИТА	1070-11-04598-12	2
11	ПЕРЕДНЯЯ ПЛИТА	1070-11-04598-11	2
10	ДИСТАНЦИОННАЯ ПЛАСТИНА, ТИП 2 - 40 мм	1070-11-04598-10	16
9	ДИСТАНЦИОННАЯ ПЛАСТИНА, ТИП 1 - 30 мм	1070-11-04598-09	16
8	КОЛОСНИК, СТАНДАРТНЫЙ ТИП	1070-11-04598-08	376
7	ХОДОВОЙ РОЛИКОВЫЙ УЗЕЛ	1070-11-04598-07	4
6	БОКОВАЯ СТЕНКА - ВЕРХНЯЯ ЧАСТЬ, ТИП 2	1070-11-04598-06	14
5	БОКОВАЯ СТЕНКА - ВЕРХНЯЯ ЧАСТЬ, ТИП 1	1070-11-04598-05	2
4	БОКОВАЯ СТЕНКА - НИЖНЯЯ ЧАСТЬ, ТИП 2	1070-11-04598-04	6
3	БОКОВАЯ СТЕНКА - НИЖНЯЯ ЧАСТЬ, ТИП 1	1070-11-04598-03	2
2	ЛИТОЙ БОРТ	1070-11-04598-02	2
1	ЛИТАЯ ЦЕНТРАЛЬНАЯ РАМА	1070-11-04598-01	1

ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Акт монтажа на ФОК АО «СГОК» экспериментальной партии колосников поставки ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ

Группа НЛМК

Открытое акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

УТВЕРЖДАЮ
Начальник Фабрики Окомкования
ОАО «Стойленский ГОК»
_____ А.В. Кононыхин
«15» октября 2018 г.

А К Т
Монтажа экспериментальной партии колосников поставки ОАО «ЧЛМЗ»
из стали 40Х24Н12СЛ

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

Начальник участка окомкования и обжига: Евтушенко В.В;
Начальник участка ЦТОиР РК ФОК: Маматов Д.А;
Начальник ТО ФОК: Катаев А.П;
Начальник смены, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И;
Ведущий специалист участка окомкования и обжига: Кильянов А.В.

Составила настоящий акт о том, что 15.10.2018 года бригадой №3 ФОК под руководством ведущего специалиста участка окомкования и обжига: Кильянова А.В. были смонтированы на обжиговую тележку №175 и установлены на обжиговую машину ФОК экспериментальные колосники производства ОАО «ЧЛМЗ»:

общее количество колосников на ОТ:	396 шт.
из которых:	
- рабочих колосников производства ОАО «ЧЛМЗ»	372 шт.
- закладных колосников производства OUTOTEC	24 шт.

Подписи:

Евтушенко В.В. _____ (подпись)
Маматов Д.А. _____ (подпись)
Катаев А.П. _____ (подпись)
Иванов Д.И. _____ (подпись)
Кильянов А.В. _____ (подпись) Сапаров Ф.М.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Промежуточные ежемесячные акты контроля состояния колосникового поля при приведении промышленных испытаний на ФОК АО «СГОК»

По истечении 1-го месяца эксплуатации (испытаний)

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

АКТ

ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ КОЛОСНИКОВ

от «15» ноябр. 2018 года

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

- Начальник участка окомкования и обжига ФОК: Евтушенко В.В.;
- Начальник Технического отдела ФОК: Катаев А.П.;
- Начальник смены ФОК, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И.

Составила настоящий акт промежуточного контроля за состоянием колосников о/т экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Экспериментальная партия колосников изготовлена на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Партия колосников, изготовленных по экспериментальной технологии, была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации – 1 месяц.

Выводы: на сегодняшний день, после 1-го месяца эксплуатации опытной партии колосников, поставки «ЧЛМЗ», изготовленной по экспериментальной технологии (термообработке: закалка при температуре 1200°С и последующий отпуск при температуре 800°С) все колосники удовлетворяют требованиям заказчика, выходов из строя нет.

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 1-го месяца эксплуатации:

1. Не выявлено дефектов.

2. Не выявлено предпосылок раннего выхода из строя колосников.
3. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 1-го месяца эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК»).

Подписи:

Начальник участка окомкования и обжига ФОК
Евтушенко В.В. _____ (подпись)

Начальник Технического отдела ФОК
Катаев А.П. _____ (подпись)

Начальник смены ФОК,
ответственный за проведение испытаний
Иванов Д.И. _____ (подпись)

По истечении 2-го месяца эксплуатации (испытаний)

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

АКТ

ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ КОЛОСНИКОВ

от «17» дек. 2018 года

г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

- Начальник участка окомкования и обжига ФОК: Евтушенко В.В.;
- Начальник Технического отдела ФОК: Катаев А.П.;
- Начальник смены ФОК, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И.

Составила настоящий акт промежуточного контроля за состоянием колосников о/т экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Экспериментальная партия колосников изготовлена на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Партия колосников, изготовленных по экспериментальной технологии, была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации – 2 месяца.

Выводы: на сегодняшний день, после 2-го месяца эксплуатации опытной партии колосников, поставки «ЧЛМЗ», изготовленной по экспериментальной технологии (термообработке: закалка при температуре 1200°С и последующий отпуск при температуре 800°С) все колосники удовлетворяют требованиям заказчика, выходов из строя нет.

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 2-го месяца эксплуатации:

1. Не выявлено дефектов.

2. Не выявлено предпосылок раннего выхода из строя колосников.
3. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 2-го месяца эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК»).

Подписи:

Начальник участка окомкования и обжига ФОК
Евтушенко В.В. _____ (подпись)

Начальник Технического отдела ФОК
Катаев А.П. _____ (подпись)

Начальник смены ФОК,
ответственный за проведение испытаний
Иванов Д.И. _____ (подпись)

По истечении 3-го месяца эксплуатации (испытаний)

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

АКТ

ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ КОЛОСНИКОВ

от «15» янв. 2019 года

г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

- Начальник участка окомкования и обжига ФОК: Евтушенко В.В.;
- Начальник Технического отдела ФОК: Катаев А.П.;
- Начальник смены ФОК, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И.

Составила настоящий акт промежуточного контроля за состоянием колосников о/т экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Экспериментальная партия колосников изготовлена на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Партия колосников, изготовленных по экспериментальной технологии, была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации – 3 месяца (см. фото на рис. 1).

Выводы: на сегодняшний день, после 3-го месяца эксплуатации опытной партии колосников, поставки «ЧЛМЗ», изготовленной по экспериментальной технологии (термообработке: закалка при температуре 1200°С и последующий отпуск при температуре 800°С) все колосники удовлетворяют требованиям заказчика, выходов из строя нет.

Рис. 1. Фото установленных на обжиговую тележку №175 колосников ф. «ЧЛМЗ» после 3-х месяцев эксплуатации – отсутствие видимых дефектов

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 3-го месяца эксплуатации:

1. Не выявлено дефектов.
2. Не выявлено предпосылок раннего выхода из строя колосников.
3. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 3-го месяца эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК»).

Подписи:

Начальник участка окомкования и обжига ФОК
Евтушенко В.В. _____(подпись)

Начальник Технического отдела ФОК
Катаев А.П. _____(подпись)

Начальник смены ФОК,
ответственный за проведение испытаний
Иванов Д.И. _____ (подпись)

По истечении 4-го месяца эксплуатации (испытаний)

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

АКТ

ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ КОЛОСНИКОВ

от «15» февр. 2019 года

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

- Начальник участка окомкования и обжига ФОК: Евтушенко В.В.;
- Начальник Технического отдела ФОК: Катаев А.П.;
- Начальник смены ФОК, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И.

Составила настоящий акт промежуточного контроля за состоянием колосников о/т экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Экспериментальная партия колосников изготовлена на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Партия колосников, изготовленных по экспериментальной технологии, была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации – 4 месяца.

Выводы: на сегодняшний день, после 4-го месяца эксплуатации опытной партии колосников, поставки «ЧЛМЗ», изготовленной по экспериментальной технологии (термообработке: закалка при температуре 1200°С и последующий отпуск при температуре 800°С) все колосники удовлетворяют требованиям заказчика, выходов из строя нет.

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 4-го месяца эксплуатации:

1. Не выявлено дефектов.

2. Не выявлено предпосылок раннего выхода из строя колосников.
3. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 4-го месяца эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК»).

Подписи:

Начальник участка окомкования и обжига ФОК
Евтушенко В.В. _____(подпись)

Начальник Технического отдела ФОК
Катаев А.П. _____(подпись)

Начальник смены ФОК,
ответственный за проведение испытаний
Иванов Д.И. _____ (подпись)

По истечении 5-го месяца эксплуатации (испытаний)

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

АКТ

ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ КОЛОСНИКОВ

от «15» марта 2019 года

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

- Начальник участка окомкования и обжига ФОК: Евтушенко В.В.;
- Начальник Технического отдела ФОК: Катаев А.П.;
- Начальник смены ФОК, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И.

Составила настоящий акт промежуточного контроля за состоянием колосников о/т экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Экспериментальная партия колосников изготовлена на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Партия колосников, изготовленных по экспериментальной технологии, была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации – 5 месяцев.

Выводы: на сегодняшний день, после 5-го месяца эксплуатации опытной партии колосников, поставки «ЧЛМЗ», изготовленной по экспериментальной технологии (термообработке: закалка при температуре 1200°С и последующий отпуск при температуре 800°С) все колосники удовлетворяют требованиям заказчика, выходов из строя нет.

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 5-го месяца эксплуатации:

1. Не выявлено дефектов.

2. Не выявлено предпосылок раннего выхода из строя колосников.
3. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 5-го месяца эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК»).

Подписи:

Начальник участка окомкования и обжига ФОК
Евтушенко В.В. _____ (подпись)

Начальник Технического отдела ФОК
Катаев А.П. _____ (подпись)

Начальник смены ФОК,
ответственный за проведение испытаний
Иванов Д.И. _____ (подпись)

По истечении 8-го месяца эксплуатации (испытаний)

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

АКТ

ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ КОЛОСНИКОВ

от «17» июня 2019 года

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

- Начальник участка окомкования и обжига ФОК: Евтушенко В.В.;
- Начальник Технического отдела ФОК: Катаев А.П.;
- Начальник смены ФОК, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И.

Составила настоящий акт промежуточного контроля за состоянием колосников о/т экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Экспериментальная партия колосников изготовлена на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Партия колосников, изготовленных по экспериментальной технологии, была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации – 8 месяцев.

Выводы: на сегодняшний день, после 8-го месяца эксплуатации опытной партии колосников, поставки «ЧЛМЗ», изготовленной по экспериментальной технологии (термообработке: закалка при температуре 1200°С и последующий отпуск при температуре 800°С) все колосники удовлетворяют требованиям заказчика, выходов из строя нет.

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 8-го месяца эксплуатации:

1. Не выявлено дефектов.

2. Не выявлено предпосылок раннего выхода из строя колосников.
3. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 8-го месяца эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК»).

Подписи:

Начальник участка окомкования и обжига ФОК
Евтушенко В.В. _____ (подпись)

Начальник Технического отдела ФОК
Катаев А.П. _____ (подпись)

Начальник смены ФОК,
ответственный за проведение испытаний
Иванов Д.И. _____ (подпись)

По истечении 9-го месяца эксплуатации (испытаний), включая контроль по истечении 6-и и 7-и месяцев эксплуатации

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Фабрики окомкования

ОАО «Стойленский ГОК»

_____ А.В. Кононыхин

«25» июля 2019 г.

АКТ

КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОЛОСНИКОВ

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

Начальник участка окомкования и обжига: Евтушенко В.В;
Начальник участка ЦТОиР РК ФОК: Маматов Д.А;
Начальник ТО ФОК: Катаев А.П;
Начальник смены, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И;
Ведущий специалист участка окомкования и обжига: Кильянов А.В.

Составила настоящий акт контроля качества колосников экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Экспериментальная партия колосников изготовлена на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Экспериментальная партия колосников, изготовленных по экспериментальной технологии, была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации – 9 месяцев.

Рис. 1. Фото установленных на обжиговую тележку колосников ф. «ЧЛМЗ» после 6-и месяцев эксплуатации – отсутствие видимых дефектов

Через 6 месяцев после эксплуатации экспериментальная паллета была временно извлечена с ОМ для определения геометрических и весовых характеристик установленных колосников, в результате этого анализа установлено:

- Отсутствие любых видимых дефектов, разрушений и изменений геометрической формы колосников, установленных на балки (рис.1);
- При детальном рассмотрении демонтированного колосника (рис.2) – отсутствие видимых дефектов поверхности и любых изменений (предпосылок к образованию дефектов;
- В результате замеров веса и геометрии демонтированного колосника после эксплуатации не выявлено изменений за пределами погрешности в 1% от идентичных параметров колосников до эксплуатации – новых (таблица 1), что говорит об удовлетворительной жаростойкости и качестве детали в целом.

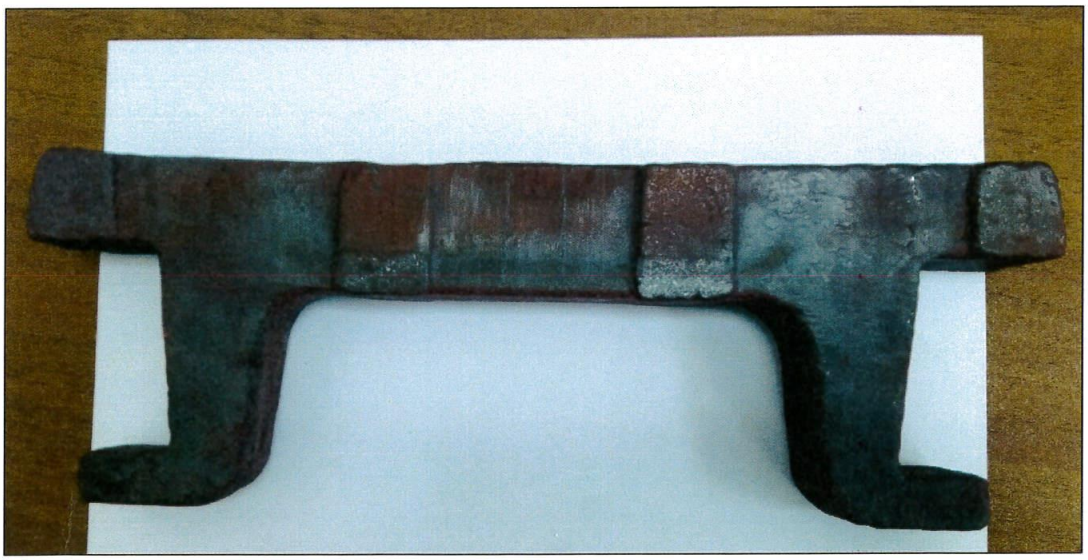


Рис. 1. Фото демонтированного с тележки колосника после 6-и месяцев эксплуатации

На сегодняшний день, после 9-и месяцев эксплуатации не одна деталь из экспериментальной партии поставки «ЧЛМЗ», изготовленная по экспериментальной технологии (термообработке: закалка при температуре 1200°С и последующий отпуск при температуре 800°С) не демонтирована по причине выхода в брак (исключение составил случай демонтажа 1-ой детали после 6-и месяцев эксплуатации для выполнения разрушаемого микроанализа – анализа микроструктуры). Таким образом, после 9-и месяцев эксплуатации, все детали партии (100%) удовлетворяют требованиям заказчика.

Талица 1: Замеры массы и геометрических размеров рабочей части колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ

№ п/п	№ детали	№ детали в партии	Вес, кг	Замеры ширины рабочей части колосника, мм			Замеры высоты рабочей части колосника, мм		
				Начала	Середины	Конца	Начала	Середины	Конца
1	47480	397	4,055	32,3	32,5	32,1	38,7	40,9	39,1
2	47455	378	4,075	32,4	32,6	32,3	38,6	41,0	38,3
3	47455	384	4,140	33,0	32,5	33,0	39,1	40,9	39,0
4	После 6 месяцев эксплуатации номера не различимы		4,143	33,7	33,3	33,2	39,6	40,6	39,1

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 6-и и 9-и месяцев эксплуатации:

- ✓ Не выявлено дефектов.
- ✓ Не выявлено предпосылок раннего выхода из строя колосников.
- ✓ В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 9-и месяцев эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК») при условии соблюдения требований:

1. Термообработка: закалка и отпуск. Закалка: выдержка в течении 120 минут при температуре 1200 °С и охлаждение на воздухе. Отпуск: выдержка в течении 150 минут при температуре 800°С и охлаждение на воздухе.
2. Ограничение содержания углерода, не выходя за рамки требований ГОСТ 977-88, в пределах: 0,30÷0,40 %. С учётом предусмотренной в ГОСТе погрешности, составляющей ±0,02, количество углерода в готовом колоснике должно находится в пределах 0,28÷0,42 %.
3. Увеличение диапазона содержания кремния в стали 40Х24Н12СЛ от предусмотренного по ГОСТ 977-88 - 0,5÷1,5% Si, предлагается сделать концентрацию кремния в диапазоне 0,5÷2,0 % Si.

Подписи:

Евтушенко В.В. _____ (подпись)

Маматов Д.А. _____ (подпись)

Катаев А.П. _____ (подпись)

Иванов Д.И. _____ (подпись)

Кильянов А.В. _____ (подпись)

ОАО ЧЕРЕПОВЕЦКИЙ ЛИТЕЙНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД

162600, Российская Федерация, Вологодская обл. г. Череповец, ул. Стройиндустрии 12
т./факс (8202) 20-28-38, E–mail chlmz@chlmz.ru

Система менеджмента качества сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001

СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА

№ 544

от «28» августа 2018 г.

ПОТРЕБИТЕЛЬ ОАО «Стойленский ГОК»

Наименование продукции	№ чертежа	Наименование НД	Марка стали / чугуна	Количество, шт.	Масса, т.
КОЛОСНИК 1-HG-30056	154.05981Б	ГОСТ 977-88	40Х24Н12СЛ	400	1.600

Химический состав материала *ст. 40Х24Н12СЛ*

Требуемый / Фактический	*C*	*Si*	*Mn*	*S*	*P*	*Cr*	*Ni*				
	н.б.0,40	*0,50-1,50*	*0,30-0,80*	*н.б.0,030*	*н.б.0,035*	*22,0-26,0*	*11,00-13,00*				
473550-1-30	0.40	0.71	0.49	0.013	0.023	22.2	11.7				
47390-31-150	0.34	0.94	0.35	0.014	0.021	22.6	13.0				
47425-151-270	0.31	0.88	0.49	0.015	0.021	22.0	12.9				
47455-271-384	0.25	0.84	0.51	0.015	0.024	22.0	11.0				
47480-385-400	0.27	0.79	0.58	0.012	0.028	22.4	11.2				

Маркировка маркером ЧЛМЗ, номер заказа, год, порядковый номер, плавка.

Отгрузку разрешаю

Начальник отдела технического контроля _____ (Бобровская М.К)

Контролер ОТК _____ (Симурина Н.Н.)

ОТК

По истечении 10-го месяца эксплуатации (испытаний)

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

АКТ

ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ КОЛОСНИКОВ

от «15» авг. 2019 года

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

- И.о. начальника участка окомкования и обжига ФОК: Кильянов А.В.;
- Начальник Технического отдела ФОК: Катаев А.П.;
- Главный специалист Исполнительной Дирекции СГОК, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И.

Составила настоящий акт промежуточного контроля за состоянием колосников о/т экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Экспериментальная партия колосников изготовлена на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Партия колосников, изготовленных по экспериментальной технологии, была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации – 10 месяцев (см. фото на рис. 1).

Выводы: на сегодняшний день, после 10-го месяца эксплуатации опытной партии колосников, поставки «ЧЛМЗ», изготовленной по экспериментальной технологии (термообработке: закалка при температуре 1200°С и последующий отпуск при температуре 800°С) все колосники удовлетворяют требованиям заказчика, выходов из строя нет.

Рис. 1. Фото установленных на обжиговую тележку №175 колосников ф. «ЧЛМЗ» после 10-и месяцев эксплуатации – отсутствие видимых дефектов

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 10-го месяца эксплуатации:

1. Не выявлено дефектов.
2. Не выявлено предпосылок раннего выхода из строя колосников.
3. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 10-го месяца эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК»).

Подписи:

И.о. начальника участка окомкования и обжига ФОК,
Кильянов А.В. _____ (подпись)

Начальник Технического отдела ФОК
Катаев А.П. _____ (подпись)

Главный специалист Исполнительной Дирекции СГОК,
ответственный за проведение испытаний
Иванов Д.И. _____ (подпись)

По истечении 11-го месяца эксплуатации (испытаний)

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

АКТ

ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ КОЛОСНИКОВ

от «16» сент. 2019 года

г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

- И.о. начальника участка окомкования и обжига ФОК: Кильянов А.В.;
- Начальник Технического отдела ФОК: Катаев А.П.;
- Главный специалист Исполнительной Дирекции СГОК, ответственный за проведение испытаний: Иванов Д.И.

Составила настоящий акт промежуточного контроля за состоянием колосников о/т экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» из стали 40Х24Н12СЛ. Экспериментальная партия колосников изготовлена на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Партия колосников, изготовленных по экспериментальной технологии, была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации –11 месяцев (см. фото на рис. 1).

Выводы: на сегодняшний день, после 11-го месяца эксплуатации опытной партии колосников, поставки «ЧЛМЗ», изготовленной по экспериментальной технологии (термообработке: закалка при температуре 1200°С и последующий отпуск при температуре 800°С) все колосники удовлетворяют требованиям заказчика, выходов из строя нет.

Рис. 1. Фото установленных на обжиговую тележку №175 колосников ф. «ЧЛМЗ» после 11-и месяцев эксплуатации – отсутствие видимых дефектов

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 11-го месяца эксплуатации:

1. Не выявлено дефектов.
2. Не выявлено предпосылок раннего выхода из строя колосников.
3. В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 11-го месяца эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК»).

Подписи:

И.о. начальника участка окомкования и обжига ФОК,
Кильянов А.В. _____ (подпись)

Начальник Технического отдела ФОК
Катаев А.П. _____ (подпись)

Главный специалист Исполнительной Дирекции СГОК,
ответственный за проведение испытаний
Иванов Д.И. _____ (подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ 13. Акт контроля состояния колосникового поля (по истечении 12-и месяцев) при приведении промышленных испытаний на ФОК АО «СГОК»

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Фабрики окомкования

ОАО «Стойленский ГОК»

_____ А.В. Кононыхин

«16» ноября 2019 г.

АКТ

КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОЛОСНИКОВ

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

Начальника участка окомкования и обжига: Крючкова В.Н.;
Начальника участка ЦТОиР РК ФОК: Маматова Д.А;
Начальника ТО ФОК: Катаева А.П;
Главного специалиста ИД, ответственный за проведение испытаний: Иванова Д.И;
Ведущего специалиста участка окомкования и обжига: Кильянова А.В.

Составила настоящий акт контроля качества колосников экспериментальной партии, изготовленных на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Экспериментальная партия колосников, изготовленных по экспериментальной Технологии (приложение 1), была установлена на обжиговую машину Фабрики окомкования АО «Стойленский ГОК» 15 октября 2018. Таким образом, детали находятся в эксплуатации более 12-и месяцев.

За время эксплуатации не было выявлено дефектов и предпосылок к ним, что отражено в ежемесячных актах (приложение 2). В настоящее время эксплуатация партии продолжается (рис. 1) в полном объёме, замечаний нет.

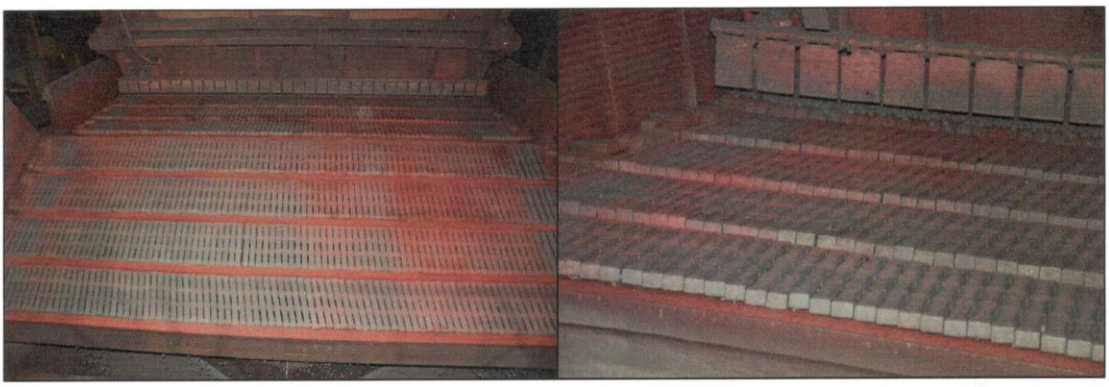


Рис. 1. Фото колосников ф. «ЧЛМЗ» после 12-и месяцев эксплуатации, установленных на обжиговую тележку №175 – отсутствие видимых дефектов

Для определения жаростойкости экспериментальной партии колосников поставки «ЧЛМЗ» были выполнены замеры веса до и после 12-и месяцев эксплуатации, которые были сравнены с аналогичными показателями колосников поставки ф. Outotec (таблица 1).

Талица 1: Замеры массы колосников

№	Поставщик	Марка стали	Срок эксплуатации, мес.	Производительность ОМ, тыс.т.	Вес, кг	Угар, Δ от начала эксплуатации		Угар, Δ по отношению к прошлому году		Удельный расход, кг/тыс.т.
						кг	%	кг	%	
1	Outotec	1.4837 (GX40CrNiSi25-12)	0	-	4,050	-	-	-	-	-
2			12	6 000	3,857	0,193	4,77%	0,193	4,77%	**3,59**
3			24	6 800	3,653	0,419	10,35%	0,226	5,86%	**3,71**
4					3,585					
5					3,675					
6					3,648					
7					3,767					
8					3,549					
9					3,540					
10					3,631					
11			36	7 000	3,357	0,693	17,11%	**0,274**	**7,55%**	**4,37**
12	ЧЛМЗ	Экспериментальная технология 40Х24Н12СЛ (корр. по хим. составу: C – 0,3÷0,4 Si – 0,5÷2,0)	0	-	4,155	-	-	-	-	-
13					4,055					
14					4,075					
15					4,140					
16					4,143					
17					4,114					
18			12	7 000	4,100	0,188	4,56%	**0,188**	**4,56%**	**2,99**
19					3,860					
20					3,990					
21					3,665					
22					4,015					
23					3,926					

Сравнение жаростойкости колосников от разных поставщиков произведены по удельной норме. Средняя удельная норма колосников Outotec за 3-и года эксплуатации составляет 3,89 кг/тыс.т., а колосников «ЧЛМЗ» за первый год эксплуатации - 2,99 кг/тыс.т., что на 23,13 % или на 0,9 кг/тыс.т. меньше, чем у колосников поставки ф. Outotec.

Исходя из расчета потребности ФОК СГОК в колосниках поставки «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии (приложение 3) необходимо приобрести:

- на 2020 год – 11 633 шт. колосников,
- на 2021 год – 22 110 шт. колосников.

Потребность в колосниках поставки ф. Outotec была бы больше на 23,13 % или на 7 805 шт. суммарно в 2020÷2021 гг.

Выводы: в связи со всем вышеизложенным предлагается рекомендовать к использованию на ФОК СГОК колосники поставки «ЧЛМЗ», изготовленные по экспериментальной технологии, а испытания по РП № 26/20.02-18 предлагается закончить. Дальнейшее отслеживание качества колосников производить силами ФОК и РК ФОК.

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 12-и месяцев эксплуатации:

- ✓ Не выявлено дефектов колосников.
- ✓ Не выявлено предпосылок для раннего выхода из строя колосников.
- ✓ Удельный расход колосников поставки «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии, ниже на 23,13 % по сравнению с колосниками поставки ф. Outotec.
- ✓ При заказе колосников "ЧЛМЗ» по экспериментальной технологии на на 2020÷2021 гг. потребность составит 33 743 шт. (на 7 805 шт. меньше по сравнению с потребностью в колосниках поставки Outotec на этот период).
- ✓ В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 12-и месяцев эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК») при условии соблюдения требований:

1. Термообработка: закалка и отпуск. Закалка: выдержка в течении 120 минут при температуре 1100 °С и охлаждение на воздухе. Отпуск: выдержка в течении 150 минут при температуре 900°С и охлаждение на воздухе [температуры откорректированы для достижения оптимального качества и себестоимости производства колосников].
2. Ограничение содержания углерода, не выходя за рамки требований ГОСТ 977-88, в пределах: 0,30÷0,40 %. С учётом предусмотренной в ГОСТе погрешности, составляющей ±0,02, количество углерода в готовом колоснике должно находится в пределах 0,28÷0,42 %.
3. Увеличение диапазона содержания кремния в стали 40Х24Н12СЛ от предусмотренного по ГОСТ 977-88 - 0,5÷1,5% Si, предлагается сделать концентрацию кремния в диапазоне 0,5÷2,0 % Si.

- ✓ Рекомендовать колосники поставки «ЧЛМЗ» к применению на ФОК СГОК.
- ✓ Предлагается закончить испытания по РП № 26/20.02-18 с положительным заключением.

Подписи:

Крючков В.Н. _____ (подпись)

Маматов Д.А. _____ (подпись)

Катаев А.П. _____ (подпись)

Иванов Д.И. _____ (подпись)

Кильянов А.В. _____ (подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ 14. Контроля качества колосников опытной партии изготовленных по экспериментальной технологии после 2-х лет эксплуатации по факту завершения промышленных испытаний на ФОК АО «СГОК»

Группа НЛМК

Акционерное общество
СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Фабрики окомкования

ОАО «Стойленский ГОК»

_____ А.В. Кононыхин

«18» февраля 2021 г.

АКТ

КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОЛОСНИКОВ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПО ФАКТУ ЗАВЕРШЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

_____ г. Старый Оскол № _____

Комиссия в составе:

И.о. начальника участка окомкования и обжига: Столярова Д.М.;
Начальника отдела ЦТОиР РК ФОК: Маматова Д.А.;
Начальника ТО ФОК: Смирновой Ю.В.;
Главного специалиста ИД, ответственный за проведение испытаний: Иванова Д.И.;
Ведущего специалиста ТО: Кильянова А.В.

Составила настоящий акт контроля качества колосников опытной партии, изготовленных по экспериментальной технологии (приложение 1) на ОАО «ЧЛМЗ» для промышленных испытаний, проводимых в соответствии с РАБОЧИМ ПЛАНОМ № 26/20.02-18 «Проведения опытно-промышленных испытаний колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ производства ОАО «ЧЛМЗ» для обжиговой машины OUTOTEC 768 на участке окомкования и обжига ФОК».

Для определения технико-эксплуатационных параметров колосников опытной партии – результаты испытаний сравнивались с аналогичными показателями колосников поставки ф. Outotec, массово эксплуатируемых на обжиговой машине (ОМ) ФОК СГОК.

В соответствии с актами монтажа/демонтажа обжиговых тележек (о/т) и журналом учёта технического обслуживания о/т: экспериментальная партия колосников была установлена на ОМ ФОК СГОК 15 октября 2018 г., а демонтирована для подведения итогов – 29.12.2020 г. Учитывая все ТО, опытная партия находилась в эксплуатации 785 суток (таблица 1).

Параметры эксплуатации опытной партии были сравнены с о/т №134 с колосниковым полем поставки Outotec, колосники находились в эксплуатации 1517 суток (также учитывая все ТО), за это время, от 20.11.2019 на о/т №134 Outotec произошла выбраковка колосников в количестве 32 штук.

Таблица 1. Время в эксплуатации колосников в соответствии с учётной документацией

О/Т №	Установка на ОМ	Снятие с ОМ	Время в работе, суток	Время в работе, лет
№175 (ЧЛМЗ)	16.10.2018	21.05.2019	217	0,59
	31.05.2019	06.11.2019	159	0,44
	16.11.2019	29.12.2020	409	1,12
		СУММА	**785**	**2,15**
№134 (Outotec)	01.10.2016	08.01.2018	464	1,27
	28.01.2018	14.10.2018	259	0,71
	16.10.2018	20.11.2019	400	1,10
	30.11.2019	28.12.2020	394	1,08
		СУММА	**1517**	**4,16**

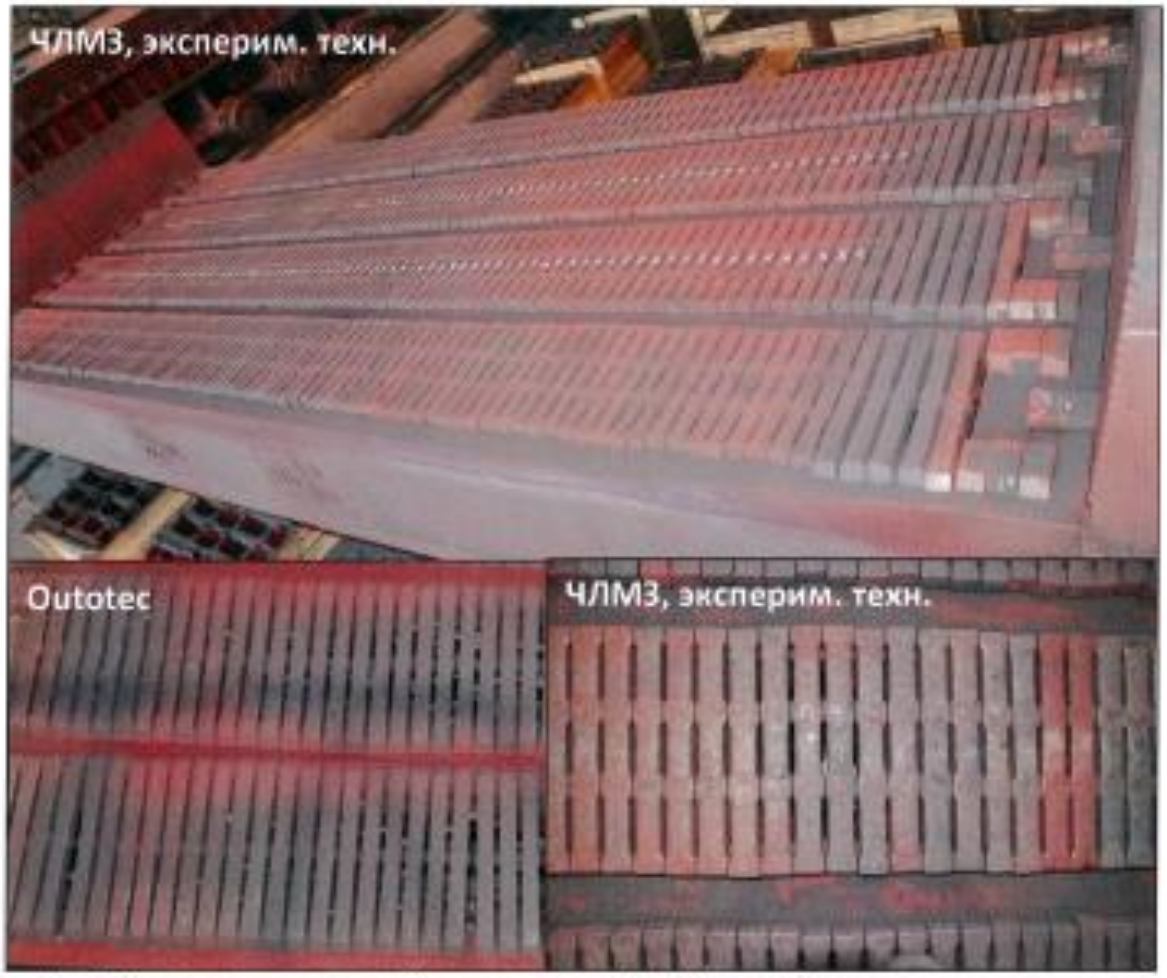


Рис. 1. Фото колосников опытной партии, поставки «ЧЛМЗ» после 26-и месяцев эксплуатации и применяемых колосников, поставки Outotec

На протяжении более 2-х лет эксплуатации состояние опытной партии колосников отслеживалось, за это время не было выявлено дефектов и предпосылок к ним, что также отражено в актах (приложение 2). В настоящее время эксплуатация партии продолжается в полном объёме, состояние колосникового поля удовлетворительное, замечаний нет (рис. 1).

Для определения жаростойкости экспериментальной партии колосников поставки «ЧЛМЗ» были выполнены замеры веса до и после 26-и месяцев эксплуатации, которые были сравнены с аналогичными показателями колосников поставки ф. Outotec (табл. 2, прил. 3).

Талица 2: Жаростойкость колосников поставки ЧЛМЗ (экспериментальная технология) и Outotec

№	Поставщик	Марка стали	Срок эксплуатации, г.	Производительность ОМ, тыс.т.	Вес, кг	Брак, шт.	Средняя потеря в весе колосника за весь срок экспл., кг/шт	Средний угар, кг/шт в год	Потери по браку %	Удельный расход, кг/тыс.т. (без/с учетом брака)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
1	Outotec	1.4837 (GX40CrNiSi25-12)	0	-	4,050[1]	-	-	-	-	-
2			4,16	7 000	3,618	32[2]	0,208	0,1040	8,51%	**1,659/1,800**
3	ЧЛМЗ	40Х24Н12СЛ Экспериментальная технология	0	-	4,090[3]	-		-	-	-
4			2,15	7 000	3,883	-	0,432	0,0965	-	**1,539**

Сравнение жаростойкости колосников от разных поставщиков произведены по угару (столбец 8 таблицы 2) как средняя потеря массы в кг. на единицу (штуку) в год (разница массы колосников до и после эксплуатации), погрешность замеров сведена к минимуму количеством взвешиваний (приложение 3) и выполнением взвешиваний на поверенных лабораторных весах (рис.2). Экспериментальная партия колосников имеет на **7,23%** выше жаростойкость по отношению к колосникам поставки ф. Outotec.

Потери по браку (столбец 11 таблицы 2) определены как % вышедших из строя от количества установленных колосников этого типа (376 шт. рабочих колосников). На протяжении промышленных испытаний (2,15 лет) экспериментальная партия колосников не имеет потерь по браку и не имеет предпосылок к раннему выходу из строя (что отчетливо видно на рис. 1). Учитывая, что все без исключения дефекты литья проявляются на протяжении первого года эксплуатации[4,5,6], можно сделать вывод, что оба поставщика показали высокое качество литья и при правильной эксплуатации дефектообразование колосников обеих партий возможно лишь по механизму высокотемпературной коррозии (угару), который невозможно устранить/исключить. Соответственно, предлагается сравнивать эти показатели только после определения полного среднего срока службы поставщиков от обеих партий, который по обеим партиям еще не наступил.

Сравнение стойкости выполнено по удельной норме (столбец 12 таблицы 2). Этот показатель включает только разницу в жаростойкости и не включает дополнительную разницу по выходу в брак. Удельная норма рассчитана как отношение суммарной потери веса всех установленных колосников (111 672 шт.) за год эксплуатации к производительности ОМ (7 млн.т. в год). Таким образом, удельный расход колосников опытной партии поставки ЧЛМЗ на **7,23%** меньше (или на 0,120 кг/тыс.т.), чем у

---

[1] По данным документации (чертежей) в связи с отсутствием замеров веса новых и возможности выполнить такие замеры.
[2] По актам, ТО О/Т (переборка поля) от 20.11.2019, выбраковка по угару, дальнейший учет в угаре по весу.
[3] По результатам взвешиваний, зафиксированных в актах входного контроля.
[4] Гуляев А. П., Гуляев А. А. Металловедение. Учебник для вузов 7-е издание. – Москва: Металлургия, 2011. – 643 с.
[5] Учитель А.Д., Гасик М.И., Панченко А.Н. Исследование химической эрозии колосников конвейерных машин при обжиге малозорудных окатышей. Сообщ. 3. Высокотемпературная химическая эрозия колосников из стали 40Х24Н12СЛ при взаимодействии окалины с карбонатом натрия. 2008. № 2. С. 31-35.
[6] Иванов, Д.И. Механизм высокотемпературной коррозии жаростойкой хромоникелевой стали / Д.И. Иванов, А.А. Кокуков, Л.Ф. Уразова // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. - 2016. - Том 59. - № 3. - С. 180–184.

колосников поставки ф. Outotec. При этом, с учётом текущих потерь по браку, колосники опытной партии показали превосходящее на 14,5% качество по сравнению с колосниками Outotec.

Рис. 2. Поверка весов

Расчёт потребности показан в таблице 3. Учитывая, что текущая потребность в колосниках на ФОК СГОК составляет 1050 шт./мес. (12 600 шт./г.) при 7 млн.тонн. окатышей в год, а потребность, основанная на удельной норме экспериментальной партии колосников ЧЛМЗ составит 900 шт./мес. (10 800 шт./г.) разница составит 150 шт./мес. (1 800 шт./г.).

Таблица 3. Расчёт потребности в колосниках

Параметр	Расход колосников	
	в мес.	в год
По удельной норме Outotec		
- без учета выхода в брак	969	11 620
- с учетом выхода в брак	1051	12 603
По удельной норме ЧЛМЗ	900	10 800
Текущая потребность ФОК СГОК	1050	12 600

Выводы: колосники, изготовленные ЧЛМЗ по экспериментальной технологии, показали превосходящие эксплуатационные характеристики по сравнению с колосниками поставки ф. Outotec (уменьшенный на **7,23%** удельный расход). В связи со всем вышеизложенным предлагается рекомендовать к использованию на ФОК СГОК колосники поставки «ЧЛМЗ», изготовленные по экспериментальной технологии, а испытания по РП № 26/20.02-18 закончить.

Решение комиссии: по результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 26-и месяцев эксплуатации:

- ✓ Не выявлено дефектов колосников.
- ✓ Не выявлено предпосылок для раннего выхода из строя колосников.
- ✓ Удельный расход колосников поставки «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии, составил 1,539 кг./тыс. т., что ниже на **7,23%** по сравнению с колосниками поставки ф. Outotec.
- ✓ При заказе колосников «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии, годовая потребность в колосниках уменьшится на 1 800 шт.
- ✓ В результате выполненного анализа сделан **вывод**, что экспериментальная партия колосников, после 26-и месяцев эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК») при условии соблюдения требований (приложение 1):

1. Термообработка: закалка и отпуск. Закалка: выдержка в течении 120 минут при температуре 1100 °С и охлаждение на воздухе. Отпуск: выдержка в течении 150 минут при

температуре 900°С и охлаждение на воздухе [температуры откорректированы для достижения оптимального качества и себестоимости производства колосников].

2. Ограничение содержания углерода, не выходя за рамки требований ГОСТ 977-88, в пределах: 0,30÷0,40 %. С учётом предусмотренной в ГОСТе погрешности, составляющей ±0,02, количество углерода в готовом колоснике должно находится в пределах 0,28÷0,42 %.
3. Увеличение диапазона содержания кремния в стали 40Х24Н12СЛ от предусмотренного по ГОСТ 977-88 - 0,5÷1,5% Si, предлагается сделать концентрацию кремния в диапазоне 0,5÷2,0 % Si.

✓ Рекомендовать колосники поставки «ЧЛМЗ» к применению на ФОК СГОК.

✓ Предлагается закончить испытания по РП № 26/20.02-18 с положительным заключением.

Подписи:

Столяров Д.М. _____ (подпись)

Маматов Д.А. _____ (подпись)

Смирнова Ю.В. _____ (подпись)

Иванов Д.И. _____ (подпись)

Кильянов А.В. _____ (подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ 15. Протокол Технического Совета АО «СГОК» об утверждении результатов промышленных испытаний опытной партии колосников

Группа НЛМК

Акционерное общество

СТОЙЛЕНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ

ПРОТОКОЛ

Технического совета АО «Стойленский ГОК»
проведенного 5 марта 2021 г.

26 марта 2021 года г. Старый Оскол № 10/21/1.00-08-ПР

В работе совещания принимали участие:

Генеральный директор	Напольских С.А.
Исполнительный директор	Беленко М.В.
Директор Дирекции по производству	Крючков А.В.
Директор Дирекции по техническому развитию ДР	Читалов С.Л.
Директор Дирекции по проектному управлению ДР	Нахрапова О.Ю.
Директор ДРК ДР	Метёлкин М.Н.
Директор ДСЗ ДР	Попов А.В.
Начальник УК ДР	Мязин А.Л.
Начальник ЭУ – главный энергетик Общества	Паршин Е.И.
Начальник УАМ	Татьянин А.И.
Начальник УОЭ	Кобзева Е.И.
Начальник УПЗ	Клюев А.М.
И.о. начальника ТУ	Деревянкин В.В.
Главный инженер РУ	Ковальчук Д.Н.
Начальник ДШ	Бугаец П.В.
Главный геолог	Воротынцев С.И.
Главный специалист ДПУ ДР	Иванов Д.И.

Рассмотрены вопросы:

1. О дополнительных технических решениях к разрабатываемой проектной документацию «АО «Стойленский ГОК». Дренажная шахта. Реконструкция подземного дренажного комплекса», выполняемой ООО НТЦ «НОВОТЭК».

Докладчик: Воротынцев С.И. – главный геолог.

2. Результаты промышленных испытаний «ФОК. Применение колосников, изготовленных по новой экспериментальной технологии, поставки ОАО «Череповецкий литейно-механический завод» (ОАО «ЧЛМЗ»).

Докладчик: Иванов Д.И. – главный специалист ДПУ ДР.

НЛМК

По первому вопросу:

ООО НТЦ «НОВОТЭК» осуществляет корректировку проектной документации «ОАО «Стойленский ГОК». Дренажная шахта. Реконструкция подземного дренажного комплекса». В рамках работ предусматривается реконструкция ПДК в соответствии с основными техническими решениями ведения открытых горных работ с увеличением добычи до 46,8 млн.тн. в год, выполненной ЗАО «ПитерГОРпроект». Проектной документацией на развитие открытых горных работ предусматривается поэтапная постановка борта карьера в конечное положение. Для обеспечения безопасной эксплуатации борта карьера, поставленного в конечное положение горных работ, предлагается использовать шахтно-лучевой дренаж для сбора прохода дренажных вод на борту карьера поставленном в конечное положение.

Используемый водозабор ХПВ в Восточном штреке Дренажной шахты в условиях перспективного развития АО «Стойленский ГОК» требует реконструкции, разделения подземных вод ХПВ по целевому их использованию. В составе разрабатываемой проектной документации предлагается предусмотреть раздел по хозяйственно-питьевому водоснабжению и водоснабжению технической водой «питьевого качества» с реконструкцией существующего водовода ХПВ и строительством дополнительных коммуникаций для обеспечения технической водой объектов АО «Стойленский ГОК».

По второму вопросу:

По результатам промышленных испытаний опытной партии колосников, поставки ОАО «ЧЛМЗ» (на протяжении 26-и месяцев эксплуатации) было установлено, что их удельный расход на 7,23% меньше (или на 0,120 кг/тыс.т.), чем у колосников поставки ф. Outotec (таблица 1). При этом, с учётом текущих потерь по браку, колосники опытной партии показали превосходящее на 14,5% качество по сравнению с колосниками Outotec, но показатель потерь по браку в дальнейшем не учитывался, ввиду неопределённости эксплуатационных параметров полного жизненного цикла деталей от обоих поставщиков.

Талица 1: Результаты испытаний колосников поставки ЧЛМЗ (экспериментальная технология) в сравнении с колосниками Outotec GmbH

№	Поставщик	Марка стали	Срок эксплуатации, г.	Производительность ОМ, тыс.т.	Вес, кг	Брак, шт.	Средняя потеря в весе колосника за весь срок экспл., кг/шт	Средний утяр, кг/шт в год	Потери по браку %	Удельный расход, кг/тыс.т. (без/с учетом брака)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12
1	Outotec	1.4037 (GX40CrNiSi25-12)	0	-	4,050[1]	+	+	+	-	-
2			4,16	7 000	3,618	32[2]	0,208	0,1040	0,51%	1,699/1,800
3	ЧЛМЗ	40Х24Н12СЛ Экспериментальная технология	0	-	4,090[1]	-		-	-	-
4			2,15	7 000	3,883	-	0,432	0,0965	-	1,539

[1] По данным документации (чертежей) в связи с отсутствием замеров веса новых и возможности выполнить такие замеры.
[2] По актам, ТО О/Т (переборка поля) от 20.11.2019.
[3] По результатам замечаний, зафиксированных в актах входного контроля.

При этом, фактический удельный расход колосников за 2020 год - 1,698 кг/тыс.т., что близко к определённому экспериментально - 1,659 кг/тыс.т. (таблица 1). Таким образом, в 2021 году предполагается снижение удельного расхода колосников на 0,159 кг/тыс.т. окатышей.

По результатам выполненного анализа колосников поставки ф. «ЧЛМЗ» после 26-и месяцев эксплуатации, утвержден «Акт контроля качества опытной партии изготовленных по экспериментальной технологии по факту завершения промышленных испытаний» от 18.02.2021, содержащий следующие выводы:

1. Не выявлено дефектов колосников.
2. Не выявлено предпосылок для раннего выхода из строя колосников.
3. Удельный расход колосников поставки «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии, составил 1,539 кг./тыс. т., что ниже на 7,23% по сравнению с колосниками поставки ф. Outotec.
4. При заказе колосников «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии, годовая потребность в колосниках уменьшится на 1 800 шт.
5. Экспериментальная партия колосников, после 26-и месяцев эксплуатации, удовлетворяет требованиям Заказчика (АО «Стойленский ГОК») при условии соблюдения требований к качеству изготовления, указанных в приложении к договору поставки опытной партии.
6. Рекомендовать колосники поставки «ЧЛМЗ» к применению на ФОК СГОК.
7. Предлагается закончить испытания по РП № 26/20.02-18 с положительным заключением.

Приняты решения:

По первому вопросу:

1. Рассмотреть предложенные технические решения по использованию шахтно-лучевого дренажа для сбора просочка дренажных вод на борту карьера поставленном в конечное положение в рамках разработки проектной документации по увеличению объемов добычи и переработки кварцитов до 64 млн.т. в год.

Отв. Нахралова О.Ю. *Срок: 31.12.2021*

2. Доработать предложенные технические решения по реконструкции существующего водовода ХПВ и строительству дополнительных коммуникаций, с учетом перспективного водопотребления при увеличении объемов добычи и переработки кварцитов до 64 млн.т. в год.

Отв. Воротынцев С.И., Бугаец П.В. *Срок: 31.12.2021*

По второму вопросу:

1.Утвердить результаты промышленных испытаний колосников, изготовленных по

Группа НЛМК

экспериментальной технологии, поставки ОАО «ЧЛМЗ».

2. Рекомендовать колосники поставки ОАО «ЧЛМЗ», изготовленных по экспериментальной технологии, к применению на ФОК.

3. Утвердить срок промышленных испытаний для всех новых поставщиков колосников в соответствии с рекомендацией поставщика технологии (Outotec) в диапазоне от 6 до 12 месяцев, с монтажом колосников «через один ряд».

4. Предоставить в УК ДР результаты промышленных испытаний опытной партии колосников для расчета экономического эффекта.

Отв. Иванов Д.И. *Срок: 18.03.2021*

Генеральный директор **С.А. Напольских**

Дереевянкин В.В.
44-91-74
Dereveynkin_VV@nlmk.com

НЛМК