

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора  
по научной работе

АО «НПО «ЦНИИТМАШ», проф. д.т.н.

К.Л. Косырев

*августа* 2022 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Иванова Дениса Игоревича, на тему: «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», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.3 – «Литейное производство»

### Актуальность темы диссертации.

В недавнем прошлом на отечественных обжиговых машинах (ОМ) наиболее массово применялись колосники из стали 40Х24Н12СЛ (ГОСТ 977-88). Колосники из 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 для увеличения производительности ОМ, 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 более дорогих зарубежных аналогов или более дешёвых отечественных альтернатив (таких как чугун ЧХ32, где это технологически приемлемо). Это связано с тем, что, несмотря на меньшую стоимость колосников из стали 40Х24Н12СЛ, по сравнению со стоимостью импортных колосников, рентабельность производства окатышей от увеличения производительности значительно снижается из-за дополнительных расходов на обслуживание и ремонты ОМ, связанных с низким качеством отечественных колосников.

Исходя из изложенного, актуальным являлось повышение эксплуатационного ресурса колосников (не менее 3-х лет) в современных, более агрессивных, условиях эксплуатации, что было достигнуто на основе исследования процессов дефектообразования колосников обжиговых тележек из стали 40X24H12CЛ при их эксплуатации и усовершенствования технологии изготовления колосников на всех этапах (от плавки стали до термообработки отливок). При этом изыскания проводились таким образом, чтобы принятые меры и решения не приводили к росту себестоимости детали до уровня зарубежных аналогов, с целью сохранения конкурентоспособности отечественных производителей.

### **Общая характеристика работы.**

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

Представленная диссертационная работа направлена на корректировку технологии изготовления колосников обжиговых тележек на этапах выплавки стали, заливки форм и термообработки отливок из оптимизированной по химическому составу стали 40X24H12CЛ для исключения возможности образования усадочных раковин и повышения стойкости колосников против межкристаллитной коррозии. В основе этой работы находится анализ причин выхода из строя колосников и изучение технологии их изготовления.

Изложение диссертации выполнено в основном логично и последовательно грамотным техническим языком, существенных замечаний по оформлению текста нет. Однако в ряде случаев имеет место использование технических терминов, не соответствующих общепринятым литейным терминам.

В первой главе рассмотрены общие сведения о колосниках обжиговых тележек из стали 40X24H12CЛ. Описано влияние особенностей современных условий эксплуатации колосников на их эксплуатационный ресурс и применяемая технология плавки стали и литья колосников.

Выполнен литературный обзор на предмет успешных попыток модернизации стали 40X24H12CЛ и поиск её аналогов (в т.ч. зарубежных). Сделаны выводы: об отсутствии успешных попыток модернизации стали 40X24H12CЛ, об отсутствии отечественных аналогов. На основании литерного обзора обоснована актуальность модернизации технологии изготовления колосников из стали 40X24H12CЛ на этапах плавки стали, заливки форм и термообработки.



Во второй главе описаны условия и результаты проведения промышленного статистического анализа дефектов колосников отечественного и зарубежного производства. Для установления первопричин дефектообразования колосников из стали 40X24H12СЛ (ГОСТ 977-88), изготовленных по технологии предприятий-поставщиков, выполнены статистические исследования во время эксплуатации разных партий колосников от разных поставщиков на обжиговых машинах ОК-306 АО «Лебединский ГОК» и Outotec 768 АО Стойленский ГОК».

В результате, установлены основные виды дефектов: коробление (21,3%), трещинообразование (13,2%) и локальная межкристаллитная коррозия (65,5%). Потери на угар не рассматривались ввиду малой значимости – из-за низкой стойкости колосников (в среднем – менее 1 года). Анализ брака показал, что коробление и трещинообразование с изломом замковой части колосника всегда сопровождаются усадочной раковинной в теле колосника. Подробно теоретически описаны механизмы выхода колосников из строя и выявлены причины: усадочные раковины и межкристаллитная коррозия (МКК).

Моделирование процесса эксплуатации колосников, выполненное в главе 3, доказало теоретические выводы главы 2 и дополнило картину дефектообразования:

- установлено, что во время эксплуатации наибольшему прогреву, до 1200°C, подвергается верхняя часть детали, а замковая часть имеет высокий градиент температур, таким образом в верхней части колосника создаются температурные условия для развития МКК, что объясняет её локальный характер и коррелируется с экспериментальными данными,
- величина деформации увеличивается от периферии к центру детали, а зона максимальных деформаций в колосниках с усадочными раковинами имеет в 4 раза большую площадь и на 52% большие значения деформационных напряжений,
- причиной образования продольных трещин колосников при эксплуатации является наличие в них усадочных раковин, что подтверждает достоверность заданных условий моделирования и описывает механизм трещинообразования с последующим изломом замковой части детали.

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

Далее, в четвертой главе, описана разработанная технология получения колосников из стали 40X24H12СЛ и результаты её лабораторного опробования:

**1. На этапе выплавки:** оптимизированный химический состав стали (повышение содержания кремния и среднего содержания углерода)

позволили оптимизировать этап плавки за счет применения высокоуглеродистого лома Б28 и уменьшить угар легирующих элементов в среднем на 5,7%.

**2. На этапе заливки:** изменена технология формовки колосников. Предложено взамен формовки в стопку изготавливать безопочные формы из ХТС на 6 колосников с обязательной покраской рабочей поверхности форм антипригарной цирконовой краской. Температуру заливки выдерживать на уровне  $1560+20^{\circ}$  при коэффициенте массы литниково-питающей системы  $k = 2.1$ .

В пятой главе описаны промышленные испытания опытных партий колосников, изготовленных по усовершенствованной технологии. Промышленные испытания производились в сравнении колосников, изготовленных по опытной технологии, с колосниками поставки фирмы Outotec (ФРГ) из стали GX40CrNiSi25-12, схожей по составу с испытуемой, принятых за эталон. Все результаты активировались.

По прошествии 24 месяцев промышленных испытаний дефектов и выходов из строя колосников по любым причинам не обнаружено (в том числе не выявлено МКК, трещин, коробления).

По состоянию на апрель 2022 года ОАО «ЧЛМЗ» продолжает поставлять на АО «СГОК» колосники, изготовленные по технологии, разработанной в настоящей диссертации. При этом, экспериментальная партия находится в непрерывной эксплуатации без замечаний уже более 3 лет.

Удельный расход колосников опытной партии, изготовленных по экспериментальной технологии, ниже на 23,13 % по сравнению с колосниками поставки фирмы Outotec.

Металлографические исследования микроструктуры опытных колосников до и после эксплуатации показали, что у обоих поставщиков распределение карбидной фазы в структуре металла соответствует требованиям, разработанным в диссертации. При этом колосники, изготовленные по опытной технологии, обладают более благоприятной карбидной структурой (меньшей протяженностью границ карбидных выделений), в меньшей степени обедняя металл хромом в прилегающих к карбидам участках, чем может объясняться повышенная на 23,13% жаростойкость по сравнению с эталонными (фирмы Outotec).

Экономический эффект от импортозамещения колосников фирмы Outotec на АО «СГОК» обусловлен уменьшением простоев ОМ на обслуживание за счет большей стойкости колосников и снижением затрат на закупки, благодаря более низкой стоимости отечественных колосников, изготовленных по новой технологии.



**Научная новизна диссертационной работы Иванова Д.И. заключается в следующем:**

- с привлечением современных методов исследований изучены механизмы образования основных видов дефектов отливок колосников из стали 40X24H12СЛ, приводящих к преждевременному массовому выходу колосников из строя, которыми являются межкристаллитная коррозия (65,5%) и усадочные раковины (34,5%);

- установлен степень влияния качества дефектов отливок усадочного характера и литой структуры колосников на склонность колосников к высокотемпературному разрушению и межкристаллитной коррозии;

- научно обоснован и практически подтверждены факты влияния литейных дефектов, в основном усадочных на протекания высокотемпературного разрушения рабочих поверхностей колосников из стали 40X24H12СЛ;

- установлены закономерности протекания межкристаллитной коррозии, коробления и изломов колосников из стали 40X24H12СЛ в агрессивных условиях эксплуатации конвейерных обжиговых машин и моделированы условия эксплуатации колосников методом конечных элементов из стали 40X24H12СЛ;

- установлены закономерности влияния сосредоточенных и рассредоточенных литейных дефектов усадочного характера на процессы разрушения колосников из стали 40X24H12СЛ во время эксплуатации на обжиговых машинах с помощью ПК ANSYS;

- научно обоснован и экспериментально подтверждено, что одной из основных причин, приводящих к преждевременному выходу колосников из строя являются усадочные раковины критического диаметра ( $\phi \geq 5$  мм);

- впервые применена математическая модель (по методу конечных элементов) для определения степени воздействия усадочных раковин на эксплуатационный ресурс колосников. Корреляция этих данных с данными, 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 карбидов хрома типа  $\text{Cr}_{32}\text{C}_6$ .

**Практическая ценность диссертации состоит в следующем:**

1. Разработана и внедрена в производство комплекс технологических процессов получения колосников обжиговых тележек из стали 40X24H12СЛ, обеспечивающий повышенный эксплуатационный ресурс колосников (в том числе частично превосходящий зарубежные аналоги, признанные эталоном). Это подтверждается актами контроля качества колосников на всех этапах

промышленной эксплуатации и протоколами о принятии результатов/решений.

2. Разработана усовершенствованная литейная технология изготовления колосников обжиговых тележек из стали 40Х24Н12СЛ, исключая образование сосредоточенных и рассредоточенных литейных дефектов усадочного характера.

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.

#### **Достоверность полученных результатов обеспечена:**

- достаточным объёмом численных и экспериментальных исследований на производстве, выполненных с применением научного подхода, применением компьютерного моделирования для проверки предпосылок, лабораторных испытаний на каждом этапе для отслеживания эффективности мероприятий;

- использованием известных и проверенных практикой данных натурных экспериментов, выполненными ведущими российскими и зарубежными учеными;

- практическим применением результатов работы на производстве.

#### **По диссертационной работе имеются следующие замечания:**

1. В работе недостаточно подробно описана литейная технология изготовления отливки «Колосник» до и после внедрения результатов работы.

При разработке усовершенствованной литейной технологии не привлечены инструменты компьютерного моделирования.

2. В работе не приведены результаты экономической эффективности от применения разработанной автором технологии изготовления колосников непосредственно при их производстве.

3. Не установлено влияние температур заливки форм на качество колосников, хотя в работах ЦНИИТМАШ показана методика проведения таких исследований и описаны их результаты.

4. В качестве пожелания автору порекомендовали бы рассмотреть вопрос по оптимизации геометрических размеров колосников, что могло бы обеспечить снижение удельного расхода металла на отливку.

Отмеченные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации и общей высокой оценки работы.



**Соответствие работы требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.**

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, направленную на решение актуальной задачи – повышение эксплуатационного ресурса колосников.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, основные результаты исследований и разработок опубликованы в печати.

Тематика диссертации Иванова Д.И., ее содержание и основные полученные результаты соответствуют требованиям паспорта научной специальности 2.6.3 – Литейное производство.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденным Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Иванов Денис Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.3 – Литейное производство.

Доклад по диссертационной работе заслушан и обсужден на НТС ИМиМ АО «НПО «ЦНИИТМАШ». За предложенное заключение проголосовали единогласно. Протокол №8 от 25.08.2022 г.

Отзыв составлен канд. техн. наук, зав. лаборатории «Литейные процессы» Нуралиевым Ф.А. и ведущим научным сотрудником Кафтанниковым А.С.

Председатель НТС ИМиМ  
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»,  
лауреат ГП СССР, премии Правительства РФ,  
проф., д.т.н.

Ученый секретарь НТС ИМиМ



В.С. Дуб

М.С. Соловьева