

02.06
44

Контрольная
заседание

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ПОДОЙНИКОВ ВАЛЕNTИН ГАВРИЛОВИЧ

УДК 539.3: 669.02: 622.785

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПРИСПОСОБЛЕМОСТИ К РАСЧЕТУ
УСЛОВИЙ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ КОЛОСНИКОВ ОБЖИГОВЫХ
МАШИН С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Специальность 01.02.06 - "Динамика, прочность
машин, приборов и аппаратуры"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
1983

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Гохфельд Д.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Третьяченко Г.Н.,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Шусторович В.М.

Ведущая организация - НИИтяжмаш производственного объединения
"Уралмаш".

Задача состоится 24 ноября 1983 года на заседании специализированного совета Д053.13.01 в Челябинском политехническом институте (454044, г.Челябинск, пр. им.В.И.Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ваша отставка, скрепленные печатью, в двух экземплярах просят направить по адресу: 454044, г.Челябинск, пр. им.В.И.Ленина, 76. Ученому секретарю специализированного совета Д053.13.01.

Автореферат разослан "—" 1983 г.

Ученый секретарь
специализированного совета *Риминь* —
канд.техн.наук, доцент К.М.Кононов



Актуальность работы. Конструктивные элементы металлургического оборудования в процессе эксплуатации испытывают повторные воздействия механических нагрузок и (или) тепловых потоков. В этих условиях нарушение работоспособности конструкции часто наступает в результате циклического неупругого деформирования. При непрерывном производстве, характерном для металлургии, проблема повышения эксплуатационной надежности, прочности и долговечности деталей технологического оборудования является особенно актуальной, тем более в связи с ростом единичных мощностей машин. К такому оборудованию, в частности, относится конвейерная машина для обжига железорудных окатышей, эксплуатационная надежность которой в значительной степени зависит от работоспособности колосниковой решетки.

Работа выполнена в соответствии с планом основных научных работ кафедры, координируемых АН СССР по проблеме "Механика деформируемого твердого тела" (п. I.10.2.5), в который включены вопросы разработки и внедрения методов оценки несущей способности и долговечности термонаруженных элементов конструкций применительно к металлургическому оборудованию, и координационным планом МЧМ СССР (Тема 2.4-13.24-79, работа I-81Р).

Цель работы состоит в повышении долговечности и эксплуатационной надежности колосниковых решеток обжиговых машин. Поскольку выход из строя этих решеток обычно связан с прогрессирующими изменениями формы колосников в процессе ее эксплуатации, для достижения данной цели было необходимо исследовать условия работы колосников, которые определяются повторно-переменным (близкими к циклическим) воздействием интенсивного теплового потока, и разработать методы оценки несущей способности колосника, позволяющие отразить влияние на нее различных факторов. В качестве основы для такой оценки была принята теория приспособляемости, с тем, чтобы полученные сравнительные данные использовать для разработки комплекса мероприятий, направленных на увеличение долговечности колосников и включающих предложения по изменению параметров технологического процесса (в зависимости от режимов эксплуатации обжигового конвейера), материалу и конструкции колосников.

Научная новизна. На основе теории приспособляемости исследованы причины и раскрыт механизм формоизменения колосника, оце-

нены факторы, влияющие на направление и интенсивность его прогрессирующего изгиба. Разработана методика определения предельных значений параметров внешних воздействий, отвечающих началу прогрессирующего формоизменения колосников. Разработана методика оценки условий формоизменения колосников, имеющих начальные (технологические) внутренние трещины (тела с односторонними связями).

Разработана методика экспериментального исследования кинетики температурных полей колосников в условиях эксплуатации в течение всего цикла нагрев-охлаждение. Предложена расчетно-экспериментальная методика приближенного определения температурных полей в колосниках с произвольной формой поперечного сечения. Выявлено взаимное влияние процесса накопления деформации колосника и его температурного поля.

Практическая ценность. На основе проведенного комплекса исследований даны предложения по ведению технологического процесса и разработана новая конструкция колосниковой решетки. Опытно-промышленные испытания, проведенные в цехе по производству окатышей Соколовско-Сарбайского горнообогатительного комбината (ССГОК) в 1979-81 гг., подтвердили эффективность применения в решетках обжиговых машин колосников новой конструкции. Долговечность и эксплуатационная надежность колосниковых решеток возросла в 2-3 раза.

Реализация работы в промышленности. Предложенная конструкция колосниковой решетки (а.с. 802761) в 1982 г. включена в план внедрения новой техники на Соколовско-Сарбайском и Качканарском горнообогатительных комбинатах. Колосники новой конструкции серийно производятся на РМЗ г. Рудный. К настоящему времени 100% обжиговых машин ССГОКа и 50% Качканарского ГОКа оборудованы колосниками новой конструкции. На ССГОКе внедрены также мероприятия технологического и организационного характера, направленные на повышение долговечности колосниковых решеток. Общий экономический эффект от внедрения мероприятий на указанных ГОКах составляет более 400 тысяч рублей. Сэкономлено около 700 тонн легированной стали Х28Л.

Апробация работы и публикации. Материалы работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции по новым методам расчета на прочность, надежность и долговечность конструкций (г. Свердловск, 1979 г.); на XV научном совещании по тепловым напряжениям в элементах конструкций (г. Канев, 1980 г.); на республиканской конференции по вопросам совершенствования

тепловой работы и конструкций металлургических печей (г.Днепропетровск, 1981 г.); на научно-техническом семинаре по способам повышения долговечности и надежности термонапряженного металлургического и горнometаллургического оборудования (г.Челябинск, 1983 г.); на научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (1977-1982 гг.).

По теме диссертации опубликовано 10 статей, получено 2 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и выводов, списка литературы и приложений. Она содержит 103 страницы основного текста, 21 таблицу, 74 рисунка. Библиография включает 114 источников.

Сущность рассматриваемой проблемы и объект исследования

Узлы и агрегаты ряда машин, обеспечивающих технологические процессы в металлургии, работают в условиях повторных воздействий нестационарных тепловых потоков большой мощности. В частности, одним из таких узлов является колосниковая решетка обжиговой машины. Выход ее из строя связан с потерей работоспособности отдельных колосников. Он обычно происходит в результате циклического неупругого деформирования и проявляется в форме постепенного накопления односторонней деформации, приводящего к значительным изменениям начальной геометрии колосников и нарушению работоспособности решетки. В процессе эксплуатации колосники прогибаются как вверх, так и вниз. Нарастающие от цикла к циклу остаточные прогибы приводят к образованию в колосниковой решетке увеличенных щелей. Значительный прогиб колосника вверх более опасен, т.к. это приводит к тому, что колосник выпадает из решетки; затем следует перекос решетки и последовательное выпадание из нее соседних колосников, еще пригодных для эксплуатации. Вследствие образования увеличенных щелей в колосниковой решетке падает разжение в вакуум-камерах, нарушается технологический процесс.

Восстановление колосниковых решеток (замена неисправных колосников) ведет к необходимости неплановых остановок обжиговой машины, требует расхода дорогостоящей жаропрочной стали. Среднегодовая потребность черной металлургии СССР в колосниках (для замены вышедших из строя) составляет для фабрик по производству железорудных окатышей 5,5 тысяч тонн, для аглофабрик - рик - 33,2 тысяч тонн.

Анализ литературы показывает, что особенности эксплуатационной нагруженности колосниковых решеток, механизм формоизменения колосников, факторы, влияющие на условия накопления в них деформаций – изучены недостаточно; отсутствуют методики расчета колосниковых решеток на стадии проектирования, не определены пути повышения долговечности колосников. Таким образом, изучение работы данной конструкции с целью повышения ее ресурса и надежности является актуальной научно-технической задачей, которая требует проведения комплексных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.

Известно, что нарушение работоспособности конструкций, работающих в условиях циклического неизотермического нагружения, обычно связано с реализацией одного из двух опасных состояний: непрекращающегося циклического знакопеременного деформирования (знакопеременного течения); накопления с каждым циклом нагружения деформаций одного знака во всем конструктивном элементе или некоторой его части (прогрессирующего формоизменения). Условия реализации таких опасных состояний в колосниках могут быть определены с помощью методов теории приспособляемости, в разработку которых существенный вклад внесли Д.А.Гохфельд и О.Ф.Чернявский. Достоинство указанных методов состоит в том, что они позволяют не только качественно отразить влияние различных факторов на эти условия, но и получить сравнительные количественные оценки.

В данной работе используется подход, связанный с применением кинематического метода теории приспособляемости к изучению влияния факторов, определяемых условиями нагружения, материалом и качеством изготовления колосников на прогрессирующее накопление в них односторонней деформации. Объектом исследования являлись колосники ОК108-II4A и ОК108-II6, изготовленные литьем из стали Х28Л и используемые на обжиговых машинах ОК-108 при производстве окатышей на Соколовско-Сарбайском и Качканарском ГОКах.

Определение температурных полей колосников в промышленных условиях и на стадии проектирования

При выбранном подходе к оценке несущей способности и определению условий начала прогрессирующего формоизменения колосников (на основе теории приспособляемости) необходимы данные о кинетике их температурных полей в течение рабочего цикла. С учетом теплового режима работы колосниковых решеток была разработана методика

экспериментального непрерывного определения температурных полей в колосниках, расположенных на движущихся тележках в условиях эксплуатации. Температуру в колосниках измеряли хромель-алюмелевыми термопарами индивидуального изготовления, установленными (10 шт. на колоснике) по определенной схеме, с учетом дублирования, обеспечивающего сопоставимость показаний при разных измерениях. В результате исследований получены данные о кинетике температурных полей колосников, последовательно перемещающихся по технологическим зонам обжиговой машины (зоны сушки, подогрева, обжига, рекуперации, охлаждения). Данные экспериментов характеризуют температурное поле колосника по длине, ширине и высоте поперечного сечения. Кинетика температурного поля колосника в цикле нагрев-охлаждение изучена при различных режимах работы обжигового конвейера (кратковременные остановки, изменение скорости движения и др.), а также в зависимости от состояния колосникового поля (наличие или отсутствие в решетке деформированных колосников).

Здесь отметим лишь некоторые из полученных результатов.

В начале рабочей ветви конвейера происходит медленный прогрев колосника до 180–200⁰С, затем (в зоне обжига) быстрый прогрев до 800–850⁰С (за 8–12 мин.) и быстрое охлаждение (за 3–4 минуты) до 400⁰С. Переход температур по высоте колосника (50 мм) в момент наибольшего прогрева составляет 180–200 градусов. Градиент температур по высоте сечения неодинаков (в верхней части – 5...7,5, в нижней – 1...2 град/мм) и в течение цикла он непрерывно изменяется по величине и знаку (рис. I). Распределение температуры по ширине поперечного сечения близко к равномерному (отклонение не более 8%), а по длине колосника – к линейному (температура по середине колосника выше на 150–200 градусов, чем на краях).

Анализ результатов, полученных в опытах с колосниками ОКИ08-II6, показал, что уровень их максимальных температур ниже на 100–120 градусов, а градиенты на 10–20% больше чем у колосников ОКИ08-II4A при тех же рабочих параметрах режимов обжига. Также установлено, что при прочих неизменных условиях снижение скорости движения обжигового конвейера ведет к повышению уровня температуры колосника на 80–120 градусов.

Термометрирование прямого колосника, расположенного рядом с деформированным, а также деформированных колосников с разной стрелой прогиба (II и 32 мм), показало существенное отличие максимальных значений температур (на 150–200 градусов) от колосников ис-

правной колосниковой решетки. При режимах с остановками у прямых колосников, расположенных рядом с деформированными (что равносильно увеличенной щели), не только увеличивается уровень температуры, но и изменяется характер ее распределения по сечению на этапах нагрева и охлаждения (рис.2).

Определение температурных полей в проектируемых элементах колосниковой решетки представляет значительные трудности, которые состоят в недостаточной изученности краевых условий задачи. В данной работе на основе анализа результатов термометрирования колосников и известных из литературы результатов исследований температур в нижнем горизонте слоя окатышей определено относительное влияние конвективного, лучистого и контактного теплообмена на тепловое состояние колосниковой решетки. По значениям вычисленных плотностей тепловых потоков для каждого из видов теплообмена установлено, что теплообмен колосниковой решетки в основном осуществляется через поверхности соприкосновения окатышей путем контакта и излучения (коэффициент лучистого теплообмена оказался на порядок большим, чем коэффициент теплоотдачи при теплообмене конвекцией). Вычисленный условный (суммарный) коэффициент теплоотдачи

α_{Σ} в большей части этапа нагрева находится в пределах 440-580 Вт/(м²·град). В связи с указанным, с помощью принятых допущений задача о распределении температуры по поперечному сечению колосников сведена к соответствующему расчету для неограниченной пластины. Температурное поле колосника полагается одномерным (зависит только от вертикальной координаты и от времени). Приняты следующие граничные условия.

- На этапе нагрева тепло поступает в колосниковую решетку только через ее поверхность со стороны окатышей (граничное условие II-го рода), при этом нарастание во времени температуры нижнего слоя окатышей в зонах обжига и рекуперации происходит по линейному закону. На поверхности колосниковой решетки со стороны вакуум-камер выполняется адиабатическое условие.

- На этапе охлаждения изменение во времени температуры верхней поверхности решетки - линейное, и скорость охлаждения в 1,25-1,4 раза больше средней скорости нагрева решетки в зоне обжига. Температура среды под колосниковой решеткой постоянная, равна 50°C.

Задача по определению температурного поля в поперечном сечении колосника в различные моменты времени технологического

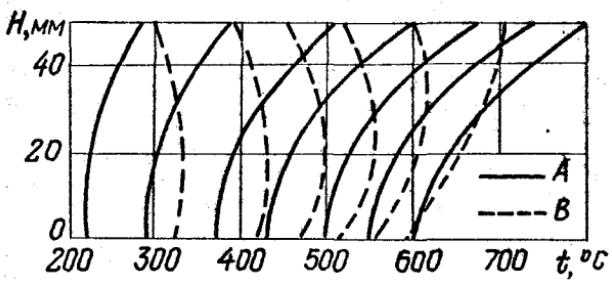


Рис.1. Характер распределения температуры по высоте поперечного сечения колосника ОК108-II4А при нагреве (A) и охлаждении (B)

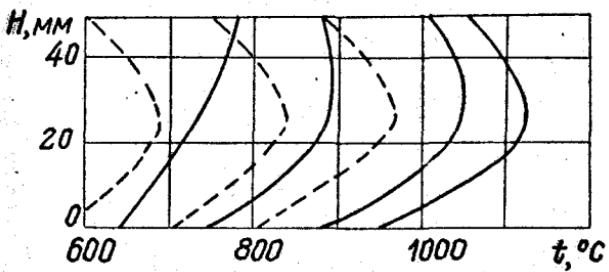


Рис.2. Распределение температуры в поперечном сечении прямого колосника, расположенного рядом с деформированным, при кратковременной остановке обжиговой машины

цикла решается поэтапно, с краевыми условиями, соответствующими процессам нагрева и охлаждения, т.е. весь расчетный период делится на два временных участка. В качестве начального условия на первом этапе принимается, что температура пластины постоянна и равна температуре среды, а на втором этапе решаемой задачи (охлаждение пластины) начальным условием является распределение температуры, полученное для конечного расчетного интервала на этапе нагрева. Решения задачи в такой постановке даны в работах Лыкова А.В., Пеховича А.И., Жидких В.М. и др.

Приближенное определение распределения температур в телах сложной геометрической формы, выполняемое с помощью известного способа деформаций, можно распространить на решетку, состоящую из колосников любой формы поперечного сечения. Это достигается подстановкой в расчетные формулы критерия Фурье и Бю линейного размера простого тела, выраженного через размеры сложного тела, и критерия формы, определяемого через отношение поверхностей соприкосновения с окатышами для колосников и тела простой формы (в данном случае - пластины).

По предлагаемой методике выполнены примеры расчета температурных полей для колосников ромбического сечения двух типов - ОК108-II4A и ОК108-II6. Сравнение результатов расчета температур в указанных колосниках с данными термометрирования в производственных условиях показало вполне удовлетворительное совпадение результатов.

Полученные по разработанной методике температурные поля представляют исходную информацию для оценки несущей способности, долговечности колосника и выбора рационального сечения на стадии проектирования.

Изучение характера и условий деформирования колосников в эксплуатации

Разработка методики оценки прогрессирующего формоизменения может быть основана только на ясном представлении о механизме деформирования колосников в условиях эксплуатации, величине и темпе нарастания деформаций, видах разрушения и условиях, в которых они реализуются. С этой целью проведены соответствующие исследования. Количественная оценка остаточной деформации и пластического разрушения колосников, находящихся в эксплуатации, показала, что колосники изогнутые вверх составляют 18-22% от общего числа деформированных колосников на тележке. При этом

максимальные накопленные деформации в колосниках достигают 9-12%, что соответствует стреле прогиба в 25-35 мм. Также установлено, что прогнутые вниз колосники встречаются группами, а колосники изогнутые вверх обычно распределены в колосниковой решетке по одному и случайным образом. Следовательно, причины, определяющие направление коробления колосников, находящихся в близких тепловых условиях, связаны с другими факторами, возможно с разбросом механических свойств используемого материала, связанного с качеством изготовления колосников и химическим составом материала. Наблюдениями за характером изменения состояния колосникового поля при эксплуатации обжигового конвейера (путем периодического фотографирования с одной и той же позиции) выявлено, что изгиб колосников вверх наступает значительно раньше (в первые недели эксплуатации) и происходит с большей скоростью нарастания пластических деформаций, чем изгиб вниз. Контрольными обмерами неисправных колосников было установлено, что одновременно с изгибом вверх они удлиняются, а при изгибе вниз - укорачиваются. При этом экспериментально выявлено, что установка колосников между полками тележки без зазора практически не влияет на их коробление.

Проведенная статистическая оценка результатов исследования химического состава материала деформированных (вышедших из строя) колосников показала, что колосникам изогнутым вверх соответствует материал с заниженным (по сравнению с нормой) содержанием хрома и повышенным содержанием углерода; в колосниках прогнутых вниз содержание хрома и углерода соответствовало норме или было близко к ней.

При выявлении литейных дефектов исследованиями установлено, что в тела колосников, вышедших из строя, имелись литейные раковины, рыхлости и микроскопические трещины, которые также имеют место в новых колосниках.

Распределение механических свойств материала (Х28Л) по объему литых колосников изучалось путем измерения твердости. Результаты показали, что твердость внутренних слоев материала в 1,5...2,5 раза ниже наружных, а разброс значений твердости, полученных в отдельных колосниках, составлял до 1,5 раз.

Разработка методики расчета колосниковых решеток на приспособляемость

Расчет условий начала прогрессирующего формоизменения колосников выполнялся с помощью приближенного кинематического метода,

разработанного Гохфельдом Д.А. на основе преобразованной им же формулировки кинематической теоремы. Она утверждает, что приспособляемость невозможна, если существует поле кинематически возможных приращений пластической деформации за цикл $\Delta \varepsilon_{ij0}''$, при котором работа напряжений на фиктивной поверхности текучести $\varphi(\sigma_{ij*}^0) = 0$ для всего тела, включая поверхности разрыва перемещений, меньше, чем работа не зависящих от времени составляющих внешних нагрузок X_{i0}, p_{i0} на соответствующих приращениях перемещений Δu_{i0} :

$$\int_V X_{i0} \Delta u_{i0} dV + \int_{S_p} p_{i0} \Delta u_{i0} dS \geq \int_V \sigma_{ij*}^0 \Delta \varepsilon_{ij0}'' dV + \sum_{\mu} \int_{S_{\mu}} \sigma_{ij*}^0 n_j \Delta u'_{i0} dS_{\mu}. \quad (1)$$

Здесь σ_{ij*}^0 — напряжения на фиктивной поверхности текучести, $\varphi(\sigma_{ij*}^0) = \min_{\tau} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij\tau}^{(e)})$; (2)

σ_{ij} — напряжения на действительной поверхности текучести $f(\sigma_{ij}) = 0$; $\sigma_{ij\tau}^{(e)}$ — напряжения от переменных составляющих внешних воздействий, вычисленные в предположении идеальной упругости материала; S_{μ} — поверхность разрыва; $\Delta u'_{i0}$ — величина разрыва; μ — число разрывов; n_j — единичный вектор нормали к поверхности разрыва.

Для расчетной схемы колосника (когда механические нагрузки и разрывы приращений перемещений отсутствуют) правая часть неравенства (1) принимает вид

$$\int_V \sigma_{ij*}^0 \Delta \varepsilon_{ij0}'' dV = \int_V \min_{\tau} [(\sigma_{ij} - \sigma_{ij\tau}^{(e)}) \Delta \varepsilon_{ij0}''] dV, \quad (3)$$

где $\sigma_{ij\tau}^{(e)}$ — тепловые напряжения.

Условия реализации в каждой точке тела колосника в течение цикла лишь одного режима течения и допущение о том, что предельный и рабочий (эксплуатационный) циклы нагружения колосника отличаются лишь пропорциональным изменением термоупругих напряжений, в то время как предел текучести остается неизменным, позволяют условие (1) с учетом (3) представить в виде

$$\int \min_{\tau} [(\sigma_{ij} - n \bar{\sigma}_{ij}^{(e)}) \Delta \varepsilon''_{ij0}] dV = 0. \quad (4)$$

Здесь $\bar{\sigma}_{ij}^{(e)}$ — напряжения в рабочем цикле.

Отсюда может быть определен коэффициент запаса по прогрессирующему формоизменению n колосника, дающий возможность получать сравнительные оценки для несущей способности колосника в зависимости от различных факторов и условий его работы. С учетом характера наблюдаемой деформации колосника в эксплуатации в расчетах принимали, что кинематически возможный пластический механизм разрушения отвечает изгибу с одновременным растяжением или сжатием

$$\Delta \varepsilon''_{ij0} = \Delta \varepsilon_0 + \Delta \dot{x} \cdot y; \quad (5)$$

варьируя знак приращения кривизны $\Delta \dot{x}$ и величину осевой деформации $\Delta \varepsilon_0$, из условия (4) находили наилучшую верхнюю оценку для коэффициента запаса по прогрессирующему формоизменению и определяли параметры пластического механизма. Здесь y — расстояние точки от нейтрального слоя.

Начало возникновения знакопеременного пластического течения в колосниках с учетом температурной зависимости величины $\sigma_t = \sigma_t(t)$ определялось из предельного условия, которое для случая линейного напряженного состояния имеет вид

$$\min_{\tau} [(\sigma_t - \sigma_z^{(e)}) \dot{\varepsilon}] - \max_{\tau} [(\sigma_t - \sigma_z^{(e)}) \dot{\varepsilon}] = 0. \quad (6)$$

Здесь $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации, которая определяет возможные направления нормалей к поверхности текучести.

Все расчеты, связанные с определением условий начала необратимого формоизменения и знакопеременного течения колосников, выполняли на ЭВМ ЕС-И020. Для этого были разработаны алгоритмы и составлены соответствующие программы.

Как известно, при решении задач приспособляемости необходим предварительный анализ упругих напряжений. В качестве исходных данных расчета термоупругих напряжений использовали результаты термометрирования колосников в условиях эксплуатации и температурные поля, полученные с помощью предложенной расчетно-экспериментальной методики. Расчетная схема колосника представлялась в виде свободно опертого бруса при одномерном распределении

температуры в любой момент времени цикла. Использовали распределение температуры по высоте поперечного сечения для середины колосника $t = t(y)$; распределение температуры по ширине достаточно близко к равномерному. При вычислении упругих напряжений принимали, что упругие и физические характеристики материала не зависят от температуры. Рассматриваемые сечения колосника (прямоугольник, ромб, трапеция и др.) симметричны относительно вертикальной оси. При вычислении напряжений в колосниках, имеющих микроскопические трещины, принималась расчетная схема, отражающая важную особенность – наличие односторонних связей, обусловленных раскрытием трещин в зоне растяжения и закрытием их в зоне сжатия.

В связи с расчетом колосников на приспособляемость по двум предельным состояниям (прогрессирующее формоизменение и закономерное течение) использовались две различные диаграммы, полученные путем аппроксимации реальных кривых деформирования при монотонном и циклическом нагружениях соответственно, при принятом допуске на остаточную деформацию, равном 0,2%.

Оценка влияния различных факторов на формоизменение колосников. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

С помощью разработанной на основе теории приспособляемости методики изучались наиболее вероятные механизмы формоизменения и факторы, влияющие на условия прогрессирующего накопления в колосниках односторонней деформации. В расчетах на формоизменение учитывались различные эксплуатационные режимы обжиговой машины и возможная неисправность колосниковой решетки (наличие в ней деформированных колосников), изменение механических характеристик в связи с химическим составом материала и дефектами изготовления колосников (наличие внутренних микроскопических трещин), влияние ползучести, конструктивное исполнение колосников. Поскольку основным предельным состоянием является прогрессирующее формоизменение (колосники, изгибающиеся выпуклостью вверх, имеют наименьший срок службы), в расчетах для большинства вариантов использовались диаграммы, полученные аппроксимацией соответствующих кривых деформирования при однократном нагружении.

Анализ результатов расчета показал, что коэффициенты запаса по формоизменению для качественно изготовленных колосников, эксплуатируемых при нормальных режимах работы обжиговой машины,

достаточно велики ($N = 6,5$). Для условий, соответствующих кратковременным остановкам машины, при которых растут температуры и температурные градиенты, запасы по формоизменению снижаются в 1,6 раза, а при неисправной решетке запасы могут оказаться меньше единицы для колосника изогнутого вверх или не на много выше - для соседнего прямого колосника ($N = 0,73$ и $N = 1,28$). Это следствие более интенсивного теплообмена в результате образования в решетке увеличенной щели. Наблюдавшееся в некоторых случаях быстрое нарастание прогибов колосника объясняется именно взаимно усиливающим влиянием деформации и вызвавших ее причин. В приведенных случаях наиболее вероятным механизмом разрушения являлся прогиб колосника вниз с одновременным укорочением.

В результате расчета колосников с микротрецинами установлено, что внутренние трещины существенно влияют на направление формоизменения. Более вероятным механизмом разрушения оказывается изгиб колосника вверх с одновременным удлинением. Величина коэффициента запаса слабо зависит от формы и размеров трещины. Расчеты дефектных колосников, выполненных из материала с различным химическим составом, показали, что уменьшение предела текучести, вызванное снижением содержания хрома, приводит к уменьшению (в 2-3 раза) коэффициента запаса по формоизменению, а неравнопрочность материала колосника на растяжение и сжатие, связанное с увеличенным содержанием углерода, приводит (также как и наличие трещин) к изменению направления формоизменения колосника.

При оценке влияния формы поперечного сечения установлено, что при постоянной площади она сравнительно мало оказывается на коэффициент запаса по формоизменению (отличие составляет не более 20%). При одинаковой ширине и высоте сечения наиболее выгодным (среди рассмотренных вариантов) с точки зрения сопротивления неупругому деформированию является прямоугольное сечение, однако, расход металла на колосник значительно больше по сравнению с ромбическим - до 30%. Предпочтительным является сечение в виде несимметричного усеченного ромба, для которого отношение высот верхней и нижней частей равно $2/3$, а наибольшей и наименьшей ширины сечения - $1/2$.

При учете ползучести материала колосников в расчетах на прогрессирующее формоизменение было принято, что отношение разрушающего напряжения к пределу ползучести, отвечающему 1% остаточной деформации при том же времени для хромистых сталей находится в пределах 1,3-1,5 для температур, лежащих в интервале $480-750^{\circ}\text{C}$.

Это позволило определить пределы ползучести при различных выдержках и в интервале заданных температур. В этих целях была использована параметрическая зависимость Ларсона-Миллера. Расчеты показали, что при нормальных режимах работы обжигового конвейера (максимальный уровень температуры колосника 780–800⁰С) коэффициент запаса близок к единице при длительности нагружения колосников 10,5 месяцев. Однако при максимальной температуре колосников равной 875–890⁰ запас близок к единице уже при сроке службы около одного месяца.

На основе результатов экспериментального и расчетно-теоретического исследований колосниковых решеток обжиговых машин (ОК-И08) даны рекомендации по технологическому процессу, связанные с режимом эксплуатации тяго-дутьевых средств в период кратковременных остановов машины, по контролю материала, разработаны новые конструкции колосниковых решеток.

При расчете на приспособляемость колосниковая решетка, состоящая из отдельных колосников новой конструкции (по середине колосника выполнены приливы, охватывающие соседний колосник), была представлена в виде системы взаимосвязанных друг с другом элементов. При этом условие начала прогрессирующего накопления односторонней деформации в решетке определяется не для отдельно взятого (дефектного) колосника, как это делалось ранее (4), а для совокупности, включающей и соседние с ним колосники,

$$\sum_{F=1}^k \int_{\tau} \min[(\sigma_r - n\sigma_z^{(e)}) \Delta \varepsilon] dF + \\ + \int_{F_*} \min[(\sigma_{r*} - n\sigma_{z*}^{(e)}) \Delta \varepsilon] dF = 0. \quad (7)$$

Здесь k – число исправных колосников, взаимодействующих с дефектным колосником (не более 6). Обозначения * соответствуют значениям параметров дефектного колосника.

Расчеты новой конструкции подтвердили ее преимущество. Опытно-промышленные испытания также показали высокую эксплуатационную надежность колосниковой решетки новой конструкции.

Общие выводы по работе

I. Разработана методика экспериментального исследования эксплуатационной нагрузкенности колосниковых решеток, которая поз-

волила получить подробную информацию о кинетике температурного поля колосника в цикле нагрев-охлаждение при различных режимах эксплуатации обжиговой машины.

2. С учетом анализа результатов экспериментального исследования предложена расчетная методика приближенного определения температурных полей в колосниках решеток обжиговых машин. Методика позволяет получить на стадии проектирования информацию, необходимую для оценки несущей способности и долговечности колосника, выбора оптимальной формы его поперечного сечения по критерию отсутствия формоизменения в условиях эксплуатации (теплосмены).

3. Изучение состояния колосниковой решетки во время ее эксплуатации позволило установить два характерных механизма пластического разрушения колосников. Первый из них (изгиб колосников выпуклостью вверх, сопровождающийся удлинением) реализуется на отдельных колосниках преимущественно в начале эксплуатации (до одного месяца) и отличается сравнительно высоким темпом нарастания остаточных деформаций. Второй механизм (прогиб вниз с укорочением) обнаруживается на колосниках, у которых длительность работы до начала появления остаточных деформаций достаточно велика (5-8 месяцев), темп нарастания прогибов в этом случае незначителен.

4. Показано, что на основе теории приспособляемости можно определить предельные условия, при которых начинается накопление в колосниках односторонней деформации и оценить влияние различных факторов на этот процесс. Из расчетов следует, что на снижение коэффициента запаса по условию начала прогрессирующего формоизменения колосников существенное влияние оказывают общий уровень температуры, который зависит от режима работы обжиговой машины (перегревы при кратковременных остановках и снижение скорости движения конвейера) и исправности самой колосниковой решетки. Исследовано взаимное влияние деформации колосника и его температурного поля.

5. Разработана методика оценки несущей способности колосников по критерию начала формоизменения с учетом микроскопических трещин, как начальных (технологических), так и образующихся вследствие термической усталости в процессе эксплуатации. С этой целью используется методика расчета на приспособляемость тел с односторонними связями. На основе результатов расчета установлено,

что микроскопические трещины, как и неравнопрочность материала колосников на растяжение - сжатие, связанная с повышенным содержанием углерода, должны приводить к изменению направления формоизменения колосников; в этих условиях наиболее вероятным механизмом разрушения оказывается прогиб колосника вверх с одновременным удлинением. Это подтверждается исследованием химического состава материала и качества изготовления колосников, вышедших из строя в связи с недопустимой деформацией, которым установлено, что колосники имеют отклонения в химическом составе и дефекты литья в виде микроскопических трещин, пустот и рыхлостей.

6. По результатам комплексных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований разработана новая конструкция разъемной колосниковой решетки (а.с. 802761), в основу которой заложен принцип совместной работы колосников. Опытно-промышленные испытания показали, что долговечность колосников новой конструкции в 2-3 раза выше по отношению к колосникам старой конструкции.

7. На основании результатов термометрирования даны рекомендации по ведению технологического процесса обжига окатышей (уровень температур) с учетом кратковременных остановок и последующего запуска обжиговой машины, использование которых позволило повысить долговечность колосников.

8. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и эксплуатации объектов агломерационного производства, а также в химической промышленности и других отраслях техники, где применяются аналогичные конструкции.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Исследование температурного поля колосников тележек обжиговых машин. - Сталь, 1979, № 7. - с.492-493. (В соавторстве с И.М.Плаговым и Н.М.Костеркиным).

2. Формоизменение колосников обжиговых машин в процессе эксплуатации. - В кн.: Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузлениях, Челябинск, 1979, № 236. - с.92-98. (В соавторстве с И.М.Плаговым).

3. Прогрессирующее изменение металлургического оборудования. - В кн.: XV научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкций. Тезисы докладов, Киев: Наукова думка, 1980. - с.26. (В соавторстве с Д.А.Гохфельдом и И.М.Плаговым).

4. Повышение долговечности колосниковой решетки обжиговых машин. - Черная металлургия. Бюл. ин-та Чертметинформация, 1981, № 14. - с.35-36. (В соавторстве с И.М.Плаговым, И.Б.Гогелем и др.).
5. А.с. 802761 (СССР). Колосниковая решетка. - Опубл. в Б.И., 1981, № 5. (В соавторстве с Д.А.Гохфельдом, И.Б.Гогелем и др.).
6. А.с. 875196 (СССР). Колосниковая решетка. - Опубл. в Б.И., 1981, № 39. (В соавторстве с Д.А.Гохфельдом, И.Б.Гогелем и др.).
7. Прогрессирующее формоизменение металлургического оборудования. - Проблемы прочности, 1981, № 12. - с.20-22. (В соавторстве с Д.А.Гохфельдом и И.М.Плаговым).
8. Расчетное и экспериментальное исследования влияния температурных полей на расход колосников и других элементов тележек обжиговых машин. - В кн.: Вопросы совершенствования тепловой работы и конструкций металлургических полей. Тезисы докладов, Днепропетровск, 1981. - с.25. (В соавторстве с И.М.Плаговым).
9. Определение температурных полей в колосниковой решетке обжиговых машин. - Изв.вузов. Черная металлургия, 1982, № 12, с.106-110.
10. Изменение конструкции колосниковой решетки обжиговых конвейерных машин. Челябинский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды. Информационный листок № 171-83, 1983. В соавторстве с Д.А.Гохфельдом, И.М.Плаговым и О.Ф.Чернявским.
11. Дефекты изготовления и их влияние на формоизменение колосников обжиговых машин. - В кн.: Способы повышения долговечности и надежности термоапрессированного металлургического и горно-металлургического оборудования. Тезисы докладов, Челябинск, 1983.- с.23-24. (В соавторстве с В.В.Лукиним).
12. Влияние трещин на работоспособность элементов металлургического оборудования в условиях теплосмен. - В кн.: Способы повышения долговечности и надежности термоапрессированного металлургического и горнометаллургического оборудования. Тезисы докладов, Челябинск, 1983. - с.27-28 (В соавторстве с О.Ф.Чернявским и В.М.Кононовым).