

На правах рукописи



Гончаров Михаил Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТА
ОПОР ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ ПУТЕМ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАЧЕНИЯ**

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: Шрубченко Иван Васильевич
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», профессор кафедры «Технологии машиностроения»

Официальные оппоненты: Захаров Олег Владимирович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении»

Разумов Михаил Сергеевич,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

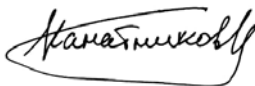
Защита диссертации состоится «16» мая 2019 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 999.115.03 при ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» по адресу: г. Орёл, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева» и на сайте <http://oreluniver.ru/diser>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения (организации), просим выслать по указанному адресу в диссертационный совет Д 999.115.03.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Канатников
Никита Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В сфере сервисных услуг по ремонту вращающихся печей, как в нашей стране, так и за рубежом широко используются мобильные технологии восстановительной обработки бандажей вращающихся печей без их демонтажа и остановки производства.

При этом преимущественно выполняется только профилактическая обработка с малыми припусками круглым ленточным шлифованием поверхности катания. Вместе с тем, как правило, после трех лет непрерывной эксплуатации наблюдается потеря геометрической точности бандажей. Это увеличивает расход энергии на вращение печи и нарушает целостность ее футеровки. В таких случаях требуется восстановительная обработка бандажа, отличающаяся не только повышенной точностью определения общего припуска, но и необходимостью его неравномерного распределения по обрабатываемой поверхности. В настоящее время устойчивый спрос на такую обработку в большинстве случаев остается нереализованным.

Одной из причин, объясняющих это обстоятельство, является то, что для выполнения таких операций требуется разработка научно обоснованного технологического процесса учитывающего, прежде всего влияние восстановительной обработки на функционирование опорного узла вращающейся печи. Главным образом оно связано с трансформацией в процессе резания базировочной поверхности бандажа и, следовательно, изменением ее контактной прочности, центрирования и напряженно-деформированного состояния корпуса печи, т.е. факторов от которых зависит безаварийная работа всей машины.

Степень разработанности. Теоретические основы мобильной технологии восстановительной обработки опор качения вращающихся печей и технологических барабанов заложены в трудах Н.А. Пелипенко, А.А. Погонина, А.И. Полунина, И.В. Шрубченко и других ученых. Дальнейшее развитие этого направления связано с работами В.Я. Дуганова, И.И. Кузнецовой, А.В. Колобова, С.Н. Санина и др. Разработаны разноплановые геометрические модели обработки бандажей при частных случаях погрешности их формы и вариантах базирования.

Полученные на их основе численные оценки результатов восстановительной обработки бандажей не позволяют объяснить и сформулировать условия исправления погрешности формы для идентификации такого общего припуска, при котором обеспечивается наибольшая геометрическая точность профиля бандажа.

Работы, посвященные исследованию влияния восстановительной обработки на контактную прочность базировочной поверхности бандажа и деформации корпуса печи, в открытых источниках информации не обнаружены.

Цель работы. Повышение точности восстановительной обработки переносным технологическим оборудованием профиля бандажа вращающейся печи путем научно обоснованного выбора геометрических параметров, опре-

деляющих формообразование базирующей поверхности бандажа при условии сохранения ее контактной прочности.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

- разработать алгоритм расчета отклонения от круглости поперечного сечения бандажей с различными погрешностями формы;
- разработать конечно-элементную модель дискретного изменения в процессе восстановительной обработки контактной прочности поверхности катания бандажа и его базирования на опорных роликах вращающейся печи;
- разработать кинематическую модель восстановительной обработки бандажа с погрешностями формы учитывающую влияние изменения контактного взаимодействия бандажа с опорными роликами;
- найти технологические режимы и параметры, позволяющие в зависимости от конструкции переносного станка и параметров погрешности формы бандажа получить минимальное отклонение от круглости его поперечного сечения с учетом изменений при этом напряженно-деформированного состояния материала на его рабочей поверхности и девиаций корпуса печи;
- осуществить апробацию результатов исследования в промышленных условиях.

Объект исследования. Восстановительная обработка переносными станками опор качения вращающихся печей.

Предмет исследования. Влияние режимов обработки, особенностей конструкций переносных станков, контактного взаимодействия бандажа и опорного ролика на процесс формообразования поперечного сечения бандажей с различными погрешностями формы и контактную прочность их поверхностей качения.

Научная новизна работы:

1. Раскрыт механизм формообразования в процессе восстановительной обработки базирующей поверхности бандажа вращающейся печи, позволяющий обеспечить геометрическую точность его формы путем обоснованного выбора общего припуска и режимов резания с учетом особенностей конструкций переносных станков, погрешностей формы профиля бандажа и девиаций корпуса печи.

2. Установлены ограничения, накладываемые на режим восстановительной обработки бандажа и связанные с ними факторы, определяемые изменением в процессе резания контактной прочности поверхностей качения бандажа и опорного ролика.

3. Найдены геометрические связи и параметры подобия, обеспечивающие возможность физического моделирования в лабораторных условиях бесцентровой обработки бандажа шлифовальным переносным станком на поворотном кронштейне.

Практическая значимость работы:

1. Разработан способ восстановительной обработки бандажей вращающихся печей, позволяющий уменьшить отклонение от круглости профиля бандажа до XII степени точности, а девиации корпуса печи по вертикали до величины не более 3 мм.

2. Технологическая подготовка восстановительной обработки бандажа дополнена методикой количественной оценки влияния режима резания на контактную прочность поверхностей качения роликоопоры.

3. Разработано новое мобильное обрабатывающее оборудование. Новизна конструктивных решений защищена патентами РФ: № 162422, № 166871 и № 169072.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует формуле специальности 05.02.08 «Технология машиностроения» и содержит разработки и результаты решения задач, связанные с областями исследования, определяемыми паспортом специальности в пунктах 3 (математическое моделирование технологических процессов) и 7 (технологическое обеспечение и повышение точности деталей машин).

Методы исследования. При проведении исследований использовались: численные методы анализа, аппроксимации, минимизации и интерполяции функций нескольких переменных, методы кинематического анализа и аналитической геометрии, метод конечных элементов (МКЭ) в составе пакета инженерного анализа *NX Advanced Simulation (Siemens PLM Software Inc.)*, среда программирования *MATLAB (MathWorks, Inc.)*. Для решения технологических задач применены методы физического моделирования, испытаний в условиях производства и статистической обработки результатов экспериментов.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Методика определения общего припуска и режимов восстановительной обработки, обеспечивающих наибольшую геометрическую точность профиля бандажа для уменьшения девиаций корпуса печи.

2. Теоретические закономерности формообразования профиля бандажа в процессе его восстановительной обработки переносным обрабатывающим оборудованием с учетом изменения базирующей поверхности бандажа.

3. Методика объемного моделирования МКЭ в программном комплексе *NX Advanced Simulation* статического изменения в процессе восстановительной обработки контактного взаимодействия бандажа и опорного ролика.

4. Численные оценки факторов, связанных с ограничениями режима восстановительной обработки бандажа вследствие ее влияния на контактную прочность поверхностей качения бандажа и опорного ролика.

5. Технологические рекомендации по реализации восстановительной обработки бандажа вращающейся печи при условии сохранения контактной прочности поверхностей качения роликоопоры.

6. Методика физического моделирования в лабораторных условиях бесцентровой обработки бандажа шлифовальным переносным станком на поворотном кронштейне.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

1. Использованием фундаментальных теоретических положений и современных методов компьютерного моделирования.
2. Сходимостью результатов, полученных теоретически и экспериментально, а также их согласованностью с известными исследованиями, приведенными в научно-технических источниках информации.
3. Апробацией результатов исследования в производственных условиях.

Реализация работы:

1. Результаты работы в виде предложенных рекомендаций по полученным режимам восстановительной обработки поверхностей качения, технологические и конструктивные решения использовались ООО «ЦемСервис» при обработке поверхностей бандажей и опорных роликов вращающихся печей ЗАО «Осколцемент». Экономический эффект от внедрения составил 700 тыс. руб. на одну вращающуюся печь.

2. Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Они отражены в рабочих программах (курсовое и дипломное проектирование) и учебно-методической литературе для специальностей бакалавриата «Машиностроение» и «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях и получили одобрение: международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова, г. Белгород, 2013 г.; международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXI научные чтения), г. Белгород, 2014 г.; IV-ой международной студенческой научно-практической конференции «Техника и технологии машиностроения», г. Омск, 2015 г.; международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии и инновации», г. Белгород, 2016 г.; международных научно-практических конференциях «Молодежь и научно-технический прогресс», г. Губкин в 2015, 2016 и 2017 г.; международных научно-практических конференциях молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород, 2014, 2017 и 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 32 научные работы, в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК по профилю специальностей, получено 3 патента на полезные модели и 3 свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из: введения, 4-х глав, заключения, приложения, списка литературы, включающего 152 источника. Основная часть работы изложена на 156 страницах, содержит 64 рисунка, 20 таблиц и 44 страницы приложений.

Содержание работы

Введение. Обоснована актуальность темы диссертационной работы, указана цель и задачи работы, научная новизна, практическая ценность.

Первая глава посвящена анализу научно-технического прогресса в области мобильных технологий ремонта вращающихся печей. Рассмотрены вопросы формообразования поперечного сечения бандажа при бесцентровой обработке переносными станками, изложенные в работах Пелипенко Н.А., Погонина А.А., Полунина А.И., Шрубченко И.В. и др. Сделан вывод о том, что существующие процессы восстановительной обработки не позволяют минимизировать отклонение от круглости поперечного сечения бандажа, так как они основаны на равномерном распределении припуска по его поверхности, а влияние процесса резания на контактное взаимодействие и девиации корпуса печи при этом не учитываются. Путем построения и анализа классификации переносных станков определены связанные с формообразованием их конструктивные параметры. Предложена конструкция нового шлифовального переносного станка на подвижном кронштейне (СПК). Сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена идентификации режимов и параметров процессов восстановительной обработки бандажей и их контактного взаимодействия с опорными роликами.

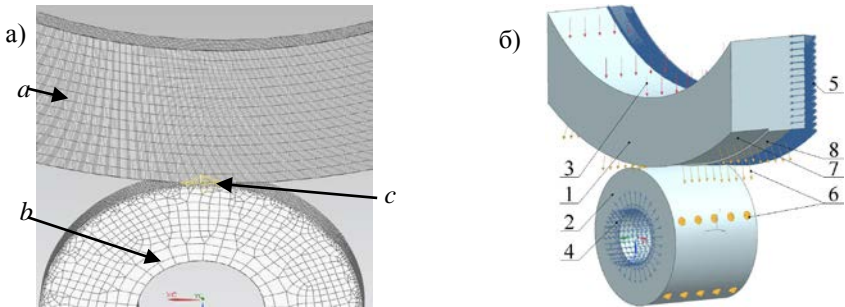


Рисунок 1. Идентификация параметров контактного взаимодействия в конечно-элементной модели: а) параметры сеток (*a* и *b* - размер элемента 80 мм, *c* - 580 элементов на ребре); б) поверхности бандажа (обработанная 7, базирующая 8), нагрузка и ограничения соответственно 3 и 4, 5, 6

На основании анализа конструкции опорного узла вращающейся печи для конечно-элементной модели контактного взаимодействия (рисунок 1) сформулированы допущения о постоянстве температуры бандажа и корпуса печи, их скорости и движущего момента, неизменяемости положения опор, которое уже учитывает (через углы γ и β поворота бандажа относительно осей соответственно ZC и XC), погрешности их расположения, а ролики имеют номинальные форму и размеры. Внешняя нагрузка от корпуса вращающейся печи распределена равномерно по внутренней поверхности сегмента и направлена вертикально вниз.

Для подробного анализа напряженно-деформированного состояния материала на пятне контакта размеры 3D гексаэдральной сетки в интегрированном CAE-приложении *NX Advanced Simulation* выбраны таким образом, чтобы на поверхности катания бандажа получилась сетка с мелкими ячейками размером (соответственно в осевом и окружном направлениях) 35x4 мм (рисунок 1). Определены допускаемые контактные напряжения $\sigma_H=1136$ МПа на рабочей поверхности бандажа, изготовленного из стали 30ГСЛ ГОСТ 977-88.

Для идентификации влияния восстановительной обработки конечно-элементная модель дополнена следующими допущениями: в каждой точке на пути резания рассматривается только результат обработки; влиянием сил резания и шероховатости обработанной поверхности на напряженно-деформированное состояние материала бандажа пренебрегаем. Кроме этого на поверхности качения бандажа выделен участок (рисунок 1), прошедший механическую обработку с образованием зазора между поверхностями бандажа и ролика.

На основе закономерностей изменения базирования бандажа разработана плоская кинематическая модель (рисунок 2) восстановительной обработки, учитывающая голономные связи системы бандаж-ролики-станок. Форма поперечного сечения (профиля) бандажа с учетом погрешности формализо-

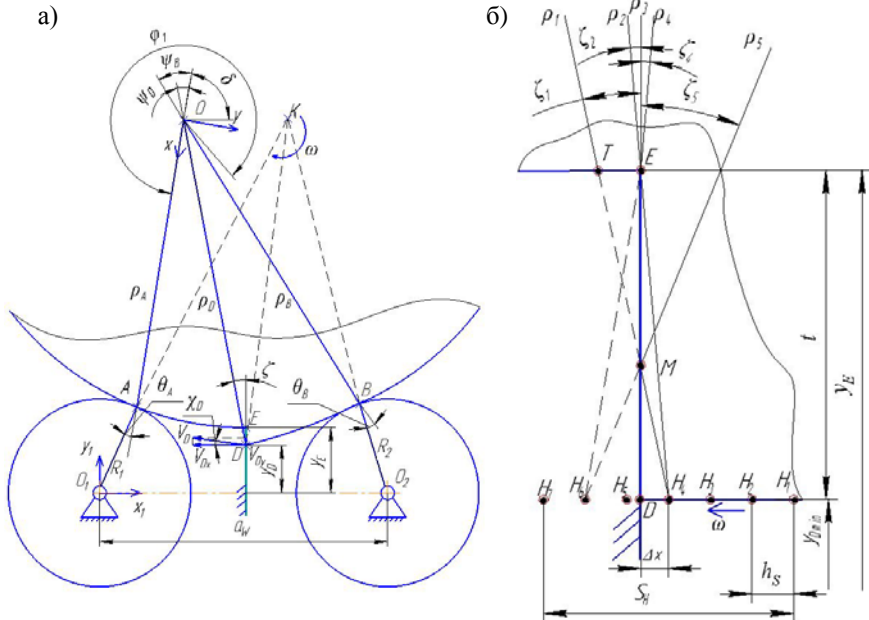


Рисунок 2. Кинематическая модель механической обработки бандажа: а) определение движения бандажа на ролике; б) проверка на возможный контакт бандажа с инструментом

вана в полярных координатах (полярный полюс расположен в геометрическом центре бандажа точке O):

$$\rho(\varphi) = R_0 + S(\varphi), \quad (1)$$

где $S(\varphi)$ – аппроксимирующая функция, например, на участке $0 \leq \varphi \leq \xi_1$:

$$S(\varphi) = \Delta R \cdot 0,5 \cdot [1 - \cos(\pi \cdot \varphi / \xi_1)] \quad (2)$$

Величину погрешности формы профиля бандажа оценивали по отклонению от круглости EFK . Для этого на основе решения задачи минимизации функции двух переменных разработан алгоритм определения EFK профиля бандажа. Погрешность формы бандажа учитывали также углом θ , определяющим направление нормали (радиуса кривизны R_k) в точке контакта бандажа и ролика:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{R_k}{d\rho(\varphi)/d\varphi}\right), \text{ где } R_k = \frac{\sqrt{\left(\rho(\varphi)^2 + \left(\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi}\right)^2\right)^3}}{\rho(\varphi)^2 + 2 \cdot \left(\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi}\right)^2 - \rho(\varphi) \cdot \frac{d^2\rho(\varphi)}{d\varphi^2}}.$$

Вычислительный процесс начинался с определения положения бандажа на роликах. Для этого при каждом угле поворота φ_1 (изменяя его с шагом $f_h = 0,0001$ рад) решая численным методом относительно угла ψ_B уравнение:

$$a_w - C(\psi_B) = 0, \quad (3)$$

где a_w – заданное межосевое расстояние,

$C(\psi_B) = \sqrt{(x_{O1}^2 - x_{O2}^2) + (y_{O2}^2 - y_{O1}^2)}$, $x_{O2} = \rho_B \cdot \cos(\psi_B) + R_2 \cdot \cos(\psi_B - \theta_B)$, $x_{O1} = \rho_A + R_1 \cdot \cos(\theta_A)$, $y_{O1} = R_1 \cdot \sin(\theta_A)$, $y_{O2} = \rho_B \cdot \sin(\psi_B) + R_2 \cdot \sin(\psi_B - \theta_B)$, определяли текущее положение точки O (рисунок 2) в декартовой системе координат $Y_1O_1X_1$:

$$x_0 = s \cdot \cos(\mu), \quad y_0 = s \cdot \sin(\mu), \quad (4)$$

где $s = \sqrt{(x_{O1}^2 + y_{O1}^2)}$, $\mu = \delta + \arcsin(y_{O1}/x_{O1})$, $\delta = \arctg\left(\frac{y_{O2} - y_{O1}}{x_{O1} - x_{O2}}\right)$.

Этот алгоритм использовали для моделирования взаимодействия инструмента и бандажа в плоскости его поперечного сечения. Для идентификации влияния преобразования (при увеличении пути резания) поверхности базирования на формообразование профиля бандажа кроме радиус-вектора $\rho = \rho(\varphi)$ исходного профиля в рассмотрение введены радиус-векторы $\rho = \rho_1(\varphi)$ и $\rho = \rho_2(\varphi)$, изменяемые соответственно на текущем и предыдущем рабочих ходах. В начале расчета функции $\rho_1(\varphi)$ за один оборот бандажа принимали, что $\rho_1(\varphi) = \rho_2(\varphi) = \rho(\varphi)$. В процессе вычислений особенности базирования определяли в зависимости от конструкции переносного станка. Для станков с ДСС принимали $R_1 = R_2 = r$, $\rho_A = \rho_1(\varphi_1)$ и $\rho_B = \rho_1(\varphi_1 + \psi_B)$. Функции $\rho_A = \rho_2(\varphi_1)$ и $\rho_B = \rho_2(\varphi_1 + \psi_B)$ использовали для формализации базирования при обработке бандажа станком УВС-М при $R_1 = R_2 = R$ или двухсторонней обработке на СПК

при $R_1=R$, $R_2=r$. В этих случаях считали, что при увеличении пути резания во всех остальных сечениях бандажа будет получаться такой же профиль, как и в плоскости расчетной модели, связанной с поперечным сечением и проходящей через точки O_1 , O и O_2 (рисунок 2). Поэтому в конце каждого рабочего хода обновляли $\rho_2(\varphi)=\rho_1(\varphi)$ при $\varphi=0...2\pi$. При односторонней обработке на станке СПК в каждом положении бандажа при $R_1=R$, $R_2=r$ и $\rho_A=\rho_2(\varphi_1)$ определяли его профили $\rho_I(\varphi)$, $\rho_{II}(\varphi)$ и $\rho_{III}(\varphi)$ в трех поперечных сечениях соответственно: в начале при $\rho_B=\rho_2(\varphi_1+\psi_B)$, в середине при $\rho_B=\rho_1(\varphi_1+\psi_B)$ и в конце рабочего хода при $\rho_B=\rho_{II}(\varphi_1+\psi_B)$. В конце каждого рабочего хода принимали $\rho_2(\varphi)=\rho_{III}(\varphi)$, $\rho_1(\varphi)=\rho_I(\varphi)$ при $\varphi=0...2\pi$.

Формообразование профиля бандажа моделировали в следующем порядке. Сначала численным методом вычисляли угол ψ_D и биение бандажа на индикаторе, установленном по середине между опорами:

$$ECR = y_{Dmax} - y_{Dmin}. \quad (5)$$

Затем определяли положение вершины инструмента (точка E рисунок 2) при первом рабочем ходе:

$$y_E = y_{Dmin} + t. \quad (6)$$

На этом этапе при $\varphi_1=0$ численным методом определяли точку H на поверхности бандажа, которая с погрешностью Δx при $\varphi=\psi_H$ совпадает с проекцией DE инструмента. Затем назначали нечетное число точек j_{max} , проверяемых на возможный контакт с инструментом и определяли длину S_H (рисунок 2б) участка поверхности бандажа, на котором они расположены:

$$S_H = (j_{max} - 1) \cdot h_s,$$

где h_s – расстояние между точками профиля бандажа. Установлено, что выбор j_{max} рационально связывать с глубиной резания t . Тогда при $S_H = t \cdot n \geq 1$ мм:

$$j_{max} = 1 + S_H / h_s = 1 + (t \cdot n) / h_s.$$

Полярные радиусы точек профиля, которые должны участвовать в проверке на возможный контакт с инструментом при $\varphi_1 \leq c \cdot f_h$, $c = (j_{max} - 1) \cdot 0.5$, $j = 1 \dots (c+1)$:

$$\rho_j = \rho(\psi_H + (c+1-j) \cdot f_h),$$

при $\varphi_1 > c \cdot f_h$, $j = 1 \dots j_{max}$: $\rho_j = \rho(\varphi_1 + \psi_H + (c+1-j) \cdot f_h)$.

В алгоритме расчета проверку на возможный контакт с инструментом всегда выполняли, если конец вектора ρ_j расположен в зоне, ограниченной прямыми DE и ET , а в остальных случаях только при $x_O \leq x_D = a_w \cdot 0.5$. При этих условиях изменяли соответствующий радиус-вектор ρ_j , используя точки его пересечения с прямыми $y = y_E$:

$$\rho_j = \sqrt{(y_O - y_E)^2 + [tg(\zeta_j) \cdot (y_O - y_E)]^2} \quad (7)$$

и $x = x_D$: $\rho_j = \sqrt{(x_O - x_D)^2 + \left[\frac{(x_O - x_D)}{tg(\zeta_j)} \right]^2}$.

Затем определяли скорость резания:

$$V_{DX} = V_D \cdot \cos(\chi_D), \quad (8)$$

где $v_D = \omega \cdot \sqrt{(x_D - x_{1K})^2 + (y_{1K} - y_D)^2}$, $\alpha_1 = \delta + \theta_A$, $\alpha_2 = \delta + \theta_B$,
 $x_{1K} = a_W \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \cos(\alpha_1) / \sin(\alpha_1 - \alpha_2)$, $y_{1K} = a_W \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) / \sin(\alpha_1 - \alpha_2)$ и
 $\chi_D = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{y_{1K} - y_D}{x_D - x_{1K}}$.

При программировании рассмотренного вычислительного процесса для повышения его эффективности и удобства исследований кинематическая модель представлена в виде трех программ (сертификаты о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017610999; 2017615862; 2017616010), совместимость которых обеспечивается средой *MATLAB*.

Третья глава посвящена моделированию восстановительной обработки поверхностей качения бандажей.

Для проверки достоверности кинематической модели обработки поверхности катания бандажа разработана и изготовлена физическая модель этого процесса (рисунок 3). Результаты экспериментов продемонстрировали существенную корреляцию закономерностей изменения индикаторных функций, полученных при математическом и физическом моделировании. Абсолютная погрешность между ними не превышает 20%, стандартное отклонение составляет тысячные доли миллиметра, а коэффициент корреляции больше чем 0,8. Поэтому можно считать, что кинематическая модель восстановительной обработки с неравномерным распределением припуска адекватно описывает процесс формообразования профиля бандажа.

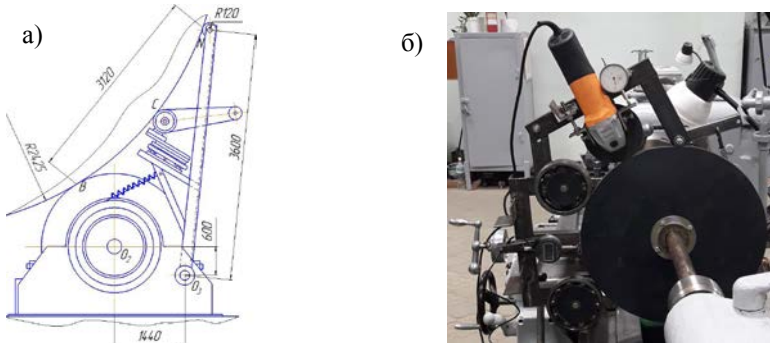


Рисунок 3. Разработка физической модели: а) эскиз шлифовального станка на поворотном кронштейне; б) экспериментальная установка для моделирования восстановительной обработки СПК с неравномерным распределением припуска по поверхности качения

С помощью расчетных моделей проанализированы исходные условия перед восстановительной обработкой. Установлено, что для выбора параметров обработки следует использовать размах (биение *ECR*) диаграммы построенной индикатором, установленным под бандажом по середине между опорами. На основании количественной оценки связи *ECR* с видом и пара-

метром погрешности формы профиля бандажа сделан вывод о том, что при $\Delta R \leq 20$ мм для обеспечения $ECR_c > 1$ мм путем выбора размеров a_w , R_1 и R_2 в станках с ДСС и СПК длина хорды AB (рисунок 2), связывающей точки базирования, должна быть больше 800 мм. Кроме того, получено, что при $ECR > 0$ корпус печи совершает плоскопараллельное движение над этой опорой, а повреждения поверхности катания возможны при погрешностях располо-

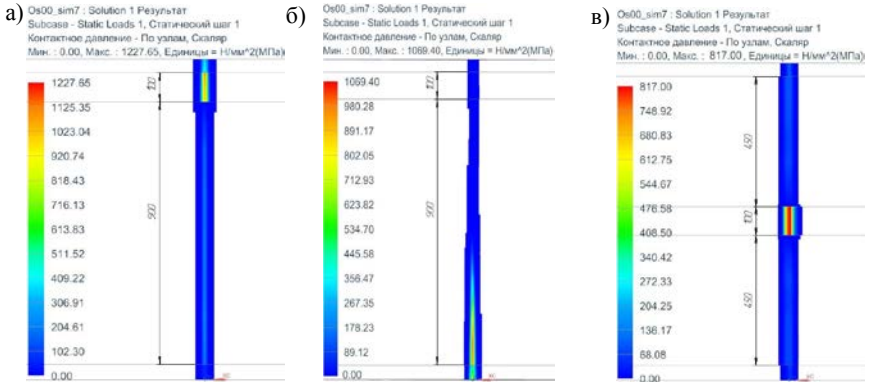


Рисунок 4. Карты контактных напряжений при моделировании обработки бандажа (длина 1000 мм) с глубиной резания 0,5 мм и завершающим участком 100 мм, расположенным: а) в конце рабочего хода, б) то же при смещении опоры на 2,5 мм, в) по середине длины бандажа

жения опорного ролика $\beta \geq 0,1$ град или смещении любого подшипникового узла (в плоскости фундаментной рамы) более чем на 5 мм.

Результаты моделирования влияния процесса резания (при равномерном распределении припуска по обрабатываемой поверхности) на контактное взаимодействие бандажа и ролика при жестких (больше 4 МН/мм) номинально расположенных опорах продемонстрировали опасный для контактной прочности многократный рост напряжений в конце каждого рабочего хода. Кроме того, при $t \geq 1,2$ мм с образованием постоянного зазора на обработанном участке (рисунок 1б) увеличивается вероятность нарушения центрирования корпуса вращающейся печи и возрастания деформаций обечайки. Предложено для предупреждения таких негативных эффектов завершать каждый проход врезным шлифованием заключительного участка и выполнять его (для уменьшения упругих деформаций обечайки) по середине длины бандажа (рисунок 4а, в). Так же определены условия, при которых погрешности расположения опорного ролика и податливость его опор при односторонней обработке в конце пути резания уменьшают контактные напряжения и способствуют сохранению центрирования корпуса вращающейся печи (рисунок 4б). При обработке с неравномерным распределением припуска по поверхности катания бандажа негативное влияние зазоров проявляется лишь при приближении к завершению всей технологической операции. Это способствует со-

хранению центрирования корпуса печи за исключением частных случаев погрешности формы бандажа, при которой зазоры одновременно появляются на обоих опорах.

С целью определения минимизирующих EFK профиля бандажа режимов резания выполнено моделирование восстановительной обработки поверхности качения бандажа с учетом влияния этого процесса на функционирование вращающейся печи. В результате установлено, что в общем случае особенности формообразования профиля при восстановительной обработке бандажа с погрешностью формы связаны с распределением припуска по обрабатываемой поверхности. При неравномерном (рисунок 5б) распределении припуска отклонение от круглости уменьшается, а форма поперечного сечения бандажа приближается к такой вписанной в исходный профиль окружности (ВРО), которая имеет с ним максимальное число равномерно распределенных точек касания. Обработка с равномерным распределением припуска (рисунок 5а) начинается или после достижения ВРО, или при выборе глубины резания по условию:

$$t \geq ECR. \quad (9)$$

При этом получаемый профиль зависит от формы базирующей поверхности бандажа. Так как в лучшем случае она не изменяется, то тогда на каждом рабочем ходе получаются геометрически подобные профили с одним и тем же EFK_x , уменьшить которое выбором параметров обработки невозможно.

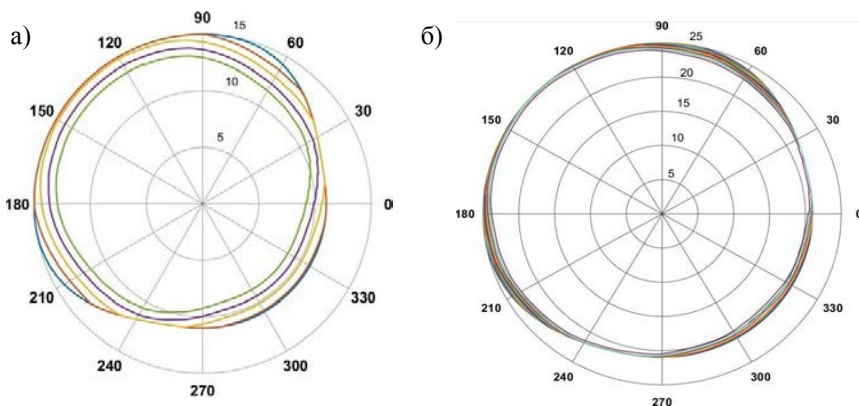


Рисунок 5. Изменение профиля бандажа ($R_H=2425$ мм, $\Delta R=2$ мм $R_{const}=2410$ мм) при моделировании механической обработки станками: а) СПК с базированием по неизменяемой поверхности и равномерным распределением припуска, при $t=0,7$ мм; $W=5$; $EFK_x=0,44$ мм при $W=2$; б) УВС-М с базированием по поверхности, полученной на предыдущем рабочем ходе и неравномерном распределении припуска, при $W=21$, $t=0,05$ мм, $EFK_x=0,28$ мм при $W=20$

Таким образом, минимальное EFK_x профиля бандажа можно получить только при обработке с неравномерным распределением припуска и базиро-

ванием по поверхности бандажа, полученной на предыдущем рабочем ходе (рисунок 5б). В этом случае припуск на обработку должен быть равен:

$$z_{\lambda}=0,5 \cdot ECR. \quad (10)$$

Этим условиям наиболее соответствуют станки УВС-М (уменьшение EFK более чем на $\Delta=70\%$). Эффективность применения СПК зависит от изменения базирующей поверхности бандажа ($\Delta=50...65\%$). Для станков с ДСС возможность уменьшения EFK ($\Delta=30...60\%$) профиля бандажа зависит в основном от параметров a_w , R_1 , R_2 и ΔR , которые определяют величину биения ECR_c на станке.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям закономерностей формообразования и изменениям контактного взаимодействия поверхностей качения в процессе восстановительной обработки (рисунок 6).

Разработаны методики восстановления геометрической точности профиля бандажа вращающейся печи и исследования изменения в процессе резания контактного взаимодействия в опоре печи и необходимое для этого оборудование и средства технологического оснащения (патенты на полезные модели № 162422, № 166871, № 169072). Результаты экспериментальной обработки продемонстрировали существенную корреляцию с закономерностями, полученными при математическом моделировании. Абсолютная погрешность между ними не превышает 10%, стандартное отклонение составляет тысячные доли миллиметра, а коэффициент корреляции больше чем 0,9 при средней степени рассеивания данных (коэффициент вариации меньше 20%).

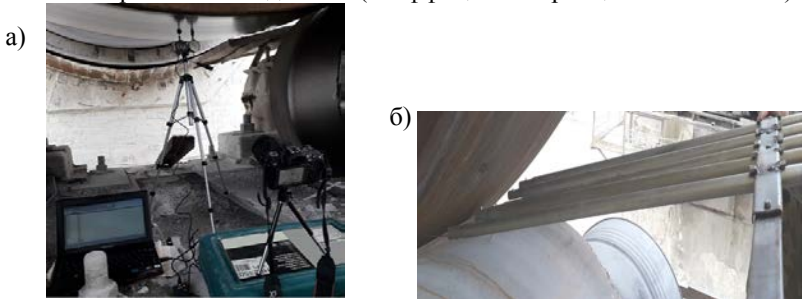


Рисунок 6. Экспериментальные исследования: а) восстановительной обработки бандажа; б) изменения зазора между бандажом и опорным роликом

Таким образом, расчетные модели достоверно описывают особенности восстановительной обработки бандажа и их можно использовать для проектирования технологического процесса с учетом особенностей функционирования опорного узла вращающейся печи.

Разработанный процесс и оборудование внедрены совместно с ООО «ЦемСервис» в условиях «Осколцемент» холдинга «Евроцемент груп». Экономический эффект от внедрения обусловлен продлением срока службы бандажей, снижением затрат энергии на вращение печи и стоимости изготовления и монтажа мобильного оборудования, расширением диапазона ремонтных операций и составляет 700 тыс. руб. на одну вращающуюся печь. Ре-

зультаты работы используются в учебном процессе БГТУ им. В.Г. Шухова. Они отражены в рабочих программах и учебно-методической литературе.

Основные результаты работы и выводы:

1. Разработана методика определения общего припуска и режимов восстановительной обработки, обеспечивающих наибольшую геометрическую точность профиля бандажа для уменьшения девиаций корпуса печи. Данная методика интегрирована в единый программный продукт с алгоритмом идентификации профиля бандажа, обеспечивающим обширную коммуникацию исходных данных. Это позволяет автоматизировать технологическую подготовку обработки бандажа с учетом влияния особенностей конструкций переносных станков. При прочих равных условиях наименьшее отклонение от круглости в пределах XII степени точности обеспечивается при применении таких переносных станков, у которых длина хорды, связывающей точки базирования, равна расстоянию между точками контакта бандажа с опорными роликами.

2. Установлено, что уменьшение отклонения от круглости более чем на 70% достигается только при обработке таких профилей, у которых индикаторная диаграмма представляет собой периодическую непрерывно дифференцируемую функцию, размах *ECR* которой близок к удвоенной сумме глубин резания за всю операцию, а общий припуск на обработку: а) при базировании по поверхности с неизменяемой формой профиля равен *ECR*; б) в остальных случаях не более $0,5 \cdot ECR$.

3. Установлено, что восстановительная обработка бандажа при отсутствии системы управления положением инструмента после исправления погрешности формы в общем случае не обеспечивает совпадение центров бандажа и корпуса печи. Его негативные перемещения над этой опорой сохраняются. Поэтому предложено результат обработки оценивать по локальному изменению радиального биения подбандажной обечайки вращающейся печи.

4. Разработана методика объемного моделирования МКЭ статического изменения в процессе восстановительной обработки контактного взаимодействия бандажа и опорного ролика. Установлено, что при любой глубине резания контактные напряжения превышают допускаемые 1136 МПа в зависимости от характера распределения припуска по поверхности бандажа: при равномерном – в конце каждого рабочего хода, а при неравномерном – только в конце последнего рабочего хода.

5. Для сохранения контактной прочности рабочих поверхностей разработан способ обработки, при котором для глубин резания не более 0,7 мм каждый рабочий ход завершается врезным шлифованием заключительного участка длиной 100 мм, а в остальных случаях – длиной не менее 130 мм. При этом для предупреждения деформаций обечайки предложено выполнять его симметрично относительно торцов бандажа.

6. Исследовано влияние в процессе обработки погрешности расположения опорных роликов на напряженно-деформированное состояние материала

базирующей поверхности бандажа. Установлено, что ее контактная прочность будет обеспечена на протяжении всего рабочего хода, если глубина резания меньше 1,3 мм и выполняется одно из следующих условий: смещение любого подшипникового узла (в плоскости фундаментной рамы) не более 5 мм, его жесткость в сечении силовой плоскостью не более 4 МН/мм.

7. Разработана методика физического моделирования в лабораторных условиях бесцентровой обработки бандажей шлифовальным переносным станком на поворотном кронштейне. Установлено, что при номинальном диаметре поверхности базирования 6100 мм реализовать моделирование возможно только для бандажей с радиальным биением профиля не менее 16 степени точности.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень, рекомендованных ВАК

1. Гончаров, М.С. Кинематическая модель механической обработки бандажа технологического барабана / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 2. С. 21–31. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-21-31

2. Гончаров, М.С. Особенности формообразования при восстановительной обработке бандажей переносными станками / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 7. С. 10–25. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-7-10-25

3. Шрубченко, И.В. Контактные проявления погрешности формы и расположения в технологических барабанах / И.В. Шрубченко, А.В. Хуртасенко, М.С. Гончаров // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 81-85.

4. Шрубченко, И.В. Контактные проявления процесса резания при восстановительной обработке бандажей технологических барабанов / И.В. Шрубченко, А.В. Хуртасенко, М.С. Гончаров // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 4. С. 95–101. DOI: 10.12737/article_58e613378c7037.64936691

5. Шрубченко, И.В. Оценка влияния жесткости основания на функционирование роlikоопоры / И.В. Шрубченко, А.В. Хуртасенко, М.С. Гончаров // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. №1. С. 94-98.

Статьи в материалах международных научных конференций

6. Гончаров, М.С. Компьютерное моделирование контакта бандажа и ролика/ М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // Сборник докладов Юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Научеомкие технологии и инновации» (XXI научные чтения). Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. – С. 216-222.

7. Гончаров, М.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния технологической системы [Электронный ресурс] / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // Сборник материалов IV-ой Междуна-

родной студенческой научно-практической конференции «Техника и технологии машиностроения» (25-30 марта 2015 г.), Омск: ОмГТУ. 2015. С. 49-53.

8. Гончаров, М.С. Кинематическая модель системы бандаж-ролики-шлифовальный станок/ М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // Сборник докладов IX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс». Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2016.–Том I.– С. 17-20.

9. Гончаров, М.С. Результаты моделирования восстановительной обработки бандажа с погрешностью формы [Электронный ресурс]/ М.С. Гончаров, А.В. Васильев, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко// Сборник докладов IX Международного молодежного форума «Образование. Наука. Производство». Белгород, 2017.

10. Гончаров, М.С. Физическое моделирование обработки бандажа вращающейся печи [Электронный ресурс] / М.С. Гончаров, Н.Ю. Шелковая, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // Сборник докладов IX Международного молодежного форума «Образование. Наука. Производство». Белгород, 2018.

Патенты на полезную модель

11. Пат. № 162422, Российская Федерация, МПК⁷ В 24 В 5/22. Станок для обработки бандажей/ Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Мурыгина Л.В., Гончаров М.С.; заявитель и патентообладатель: Белгор. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова. – № 2015130983/02; заявл. 24.07.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16 – 2 с.

12. Пат. № 166871, Российская Федерация, МПК⁷ В 23 В 5/00. Станок для обработки бандажей и опорных роликов вращающихся технологических барабанов/ Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Мурыгина Л.В., Гончаров М.С.; заявитель и патентообладатель: Белгор. Гос. Технол. Ун-т им. В.Г. Шухова.– № 2015155522/02, заявл. 23.12.2015, опубл. 10.12.2016, Бюл. №34 – 2 с.

13. Пат. № 169072, Российская Федерация, МПК⁷ В 23 В 5/00. Станок для обработки бандажей и опорных роликов вращающихся технологических барабанов/ Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Мурыгина Л.В., Гончаров М.С.; заявитель и патентообладатель: Белгор. Гос. Технол. Ун-т им. В.Г. Шухова. – № 2016111590, заявл. 28.03.2016, опубл. 02.03.2017, Бюл. №7 – 2 с.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

14. Сертификат о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017610999. Синтез формы бандажа технологического барабана с идентификацией отклонения от круглости по ГОСТ Р 53442-2009/ Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Гончаров М.С.; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2016662717; дата поступл. 23.11.2016; зарегистр. в Реестре прог. для ЭВМ 19.01.2017.

15. Сертификат о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615862. Идентификация параметров движения бандажей технологических барабанов для организации их восстановительной обработки/ Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Гончаров М.С.; заявитель и патентообладатель:

БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2017612547; дата поступл. 28.03.2017; зарегистр. в Реестре прог. для ЭВМ 25.05.2017.

16. Сертификат о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616010. Моделирование процесса восстановительной неуправляемой обработки переносными станками бандажей технологических барабанов/ Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Гончаров М.С.; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2017612981; дата поступл. 05.04.2017; зарегистр. в Реестре прог. для ЭВМ 30.05.2017.

Условные обозначения

t – глубина резания; W – номер рабочего хода; φ – полярный угол; $\rho_w(\varphi)$ – форма поперечного сечения (профиля) бандажа после рабочего хода W в полярных координатах; EFK_X , EFK_0 и EFK – отклонение от круглости (по ГОСТ Р 53442-2009) профиля бандажа соответственно минимальное, до и после обработки; R – радиус опорного ролика; r – радиус копирного ролика; R_1, R_2 – радиусы кривизны поверхности тел взаимодействующих с бандажом; $Y_1O_1X_1$ и YOX – декартовы системы координат связанные соответственно с основанием и с бандажом; φ_1 – угол поворота бандажа; ρ_A, ρ_B, ρ_D – радиус-векторы точек на бандаже; ψ_B – составляющая полярного угла; θ_A, θ_B – углы направления нормалей в точках контакта; y_D, y_E – координаты точек контакта инструмента с бандажом; t, K – мгновенный центр скоростей; ω – угловая скорость бандажа; R_H и R_0 – радиусы профиля бандажа соответственно номинальный и минимальный; ΔR – параметр погрешности профиля, $\Delta R = R_H - R_0$; ξ – центральный угол, связывающий границы участка изменения профиля бандажа; a_w – заданное межосевое расстояние; ECR или ECR_c – биение бандажа на индикаторе установленном соответственно под бандажом посередине между опорами или на станке между точками базирования; y_{Dmax}, y_{Dmin} – экстремумы индикаторной диаграммы $y_D = f(\varphi_1)$; R_{const} – постоянный радиус определяет масштаб круглограммы $\mu_w(\varphi) = \rho_w(\varphi) - R_{const}$; ДСС – станок с динамическим самоустанавливающимся суппортом, УВС-М – универсальный станок расположенный под бандажом между опорами; МКЭ – метод конечных элементов.

Подписано в печать __. __.2019. Формат 60 x 84/16.

Усл. печ. л. - 1.0 Тираж 100 экз. Заказ № __

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г.Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46