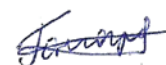


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Шрубченко И.В.

Белгород 2019

## Содержание

Введение.....	5
1. Технологические аспекты функционирования опорных узлов вращающихся печей.....	14
1.1. Параметры контакта и особенности конструкций опор вращающихся печей.....	14
1.2. Тенденции совершенствования технологии монтажа и ремонта опорных узлов вращающихся печей.....	19
1.3. Особенности конструкций переносных станков.....	25
1.4. Научно-технические основы мобильных технологий восстановительной обработки бандажей .....	32
1.5. Обоснование цели и задач исследования.....	37
1.6. Выводы .....	40
2. Идентификация режимов и параметров восстановительной обработки бандажей.....	41
2.1 Погрешности опорных узлов вращающихся печей.....	41
2.1.1 Погрешности расположения узлов вращающихся печей.....	42
2.1.2 Идентификация погрешности формы бандажей .....	46
2.2 Модель контактного взаимодействия бандажа и ролика.....	55
2.2.1 Построение конечно-элементной модели контактного взаимодействия.....	56
2.2.2 Допускаемые контактные напряжения.....	65
2.2.3 Идентификация результатов обработки бандажа.....	68
2.3 Модель восстановительной обработки бандажа .....	72
2.3.1 Кинематическая модель системы бандаж-ролики-станок.....	73
2.3.2 Варианты расширения модели.....	76
2.3.3 Идентификация процесса восстановительной обработки бандажа с погрешностью формы.....	79
2.4 Выводы .....	84
3. Моделирование восстановительной обработки поверхностей качения бандажей.....	86
3.1. Анализ исходных условий перед восстановительной обработкой .....	86

3.1.1 Перемещения бандажа с погрешностями формы .....	86
3.1.2 Экспериментальная проверка математической модели обработки бандажа..	93
3.2. Моделирование контактного взаимодействия бандажа с опорным роликом.....	100
3.2.1 Контактные проявления погрешностей формы и расположения перед восстановительной обработкой.....	101
3.2.2 Контактные проявления процесса резания.....	105
3.3. Моделирование формообразования в процессе восстановительной обработки профиля бандажа.....	115
3.3.1 Влияние технологических баз на моделирование обработки бандажей переносными станками .....	115
3.3.2. Последовательность моделирования и визуализации результатов.....	120
3.3.3. Особенности формообразования при базировании по неизменяемой поверхности .....	124
3.3.4 Выбор параметров обработки бандажей при базировании по изменяемой поверхности.....	128
3.3.5 Выводы.....	138
4. Экспериментальная восстановительная обработка поверхностей качения бандажей .....	138
4.1. Методика экспериментального исследования формообразования профиля бандажа.....	141
4.1.1 Оборудование и образцы.....	141
4.1.2 Приборы и аппаратура.....	142
4.1.3 Порядок исследования.....	143
4.1.4 Экспериментальная обработка поверхности качения бандажа шлифованием.....	146
4.2. Методика исследования изменения в процессе резания контактного взаимодействия бандажа и ролика .....	148
4.2.1 Оборудование и образцы.....	148
4.2.2 Приборы и аппаратура.....	150

4.2.3 Порядок исследования.....	151
4.2.4 Изменение контактного взаимодействия в процессе лезвийной обработки поверхности качения бандажа.....	151
4.3 Выводы по разделу.....	153
Основные результаты работы и выводы.....	155
Список литературы.....	157
Приложение 1.....	171
Приложение 2.....	172
Приложение 3.....	182
Приложение 4.....	208
Приложение 5.....	214



## Введение

В промышленности строительных материалов вращающиеся печи на протяжении более чем 100 лет используются при производстве цементного клинкера и обжиге извести. Они состоят из пустотелого корпуса цилиндрической формы толщиной 16...30 мм с утолщенными подбандажными обечайками (40...100 мм), который изнутри обложен футеровочным материалом. Корпус располагается под небольшим углом (как правило, 3...5 градусов) к горизонту. Благодаря бандажам, зафиксированным на корпусе вращающейся печи (в



Рис. 1. Опорный узел вращающейся печи 5x185 м для получения цементного клинкера:

1 – корпус; 2 – бандаж; 3 – опорный ролик; 4 – защитный кожух; 5 – подшипниковый узел; 6 – корпус подшипника; 7 – упор; 8 – рама; 9 – фундамент

зависимости от ее длины от 3 до 9 бандажей), вес печи равномерно распределяется на установленных попарно опорных роликах (рис. 1). Опорные ролики расположены таким образом, что прямые связывающие их центры вращения с геометрическим центром бандажа образуют между собой угол равный 60...65 градусов. Максимальные диаметры опорных роликов и бандажей

соответственно 2200 и 8000 мм. Диаметр и длина корпуса печи указываются в ее обозначении (рис. 1).

Печь совершает вращательное движение, которое передается от привода на корпус печи через венцовую шестерню. Скорость вращения печи зависит от технического регламента, но, как правило, при установившемся движении она не превышает 1,5 об/мин, а при ремонтах не более 5 об/час.

В процессе производства цементного клинкера печь работает по принципу противотока. Сырье (шлам) подается со стороны верхнего ("холодного") конца печи, а топливо-воздушная смесь при температуре 1300...1500° С – со стороны нижнего ("горячего") конца печи. Поэтому температура корпуса печи изменяется по его длине.

Учитывая значительные габариты и металлоемкость вращающейся печи, в большинстве случаев, монтаж печи производится на месте. Причем габаритные детали при транспортировании на место сборки разрезают, а при сборке печи их соединяют сваркой. На этих переходах возникают неизбежные погрешности для исправления, которых требуется дополнительная механическая обработка бандажа.

Погрешности формы и повреждения поверхности качения бандажа возникают и в процессе эксплуатации печи. Они нарушают ее функционирование. Ремонт (сварка, наплавка и т.п.) или замена бандажа связаны с необходимостью остановки печи и приводят к существенным материальным затратам. Например, аварийная остановка вращающейся печи 5x185 м вызывает убытки предприятия только от недовыпуска продукции пропорционально стоимости 75 т клинкера за каждый час простоя. Поэтому возникает задача восстановительной обработки бандажа без остановки производства.

Предлагаемые для ее решения мобильные технологии известны уже более 40 лет [1, 2, 18, 78]. Они выполняются переносными станками, которые специальным образом размещаются на фундаменте опоры вращающейся печи и используют ее вращение для шлифования или точения поверхности качения бандажа (рис. 2).

С каждым годом мобильные технологии все больше распространяются как в России [44, 54, 59, 60, 142], так и за рубежом [109, 140, 141, 143, 145, 146, 151]. При этом, несмотря на многочисленные позитивные результаты исследований в этой области [3, 12, 13, 18, 37, 65-74], такие технологии применяют не в полной мере. Большинство сервисных фирм по ремонту цементного оборудования используют их для профилактической обработки поверхностей качения бандажей с целью предупреждения усталостных повреждений, устранения мелких дефектов, уменьшения шероховатости и выравнивания распределения нагрузки по пятну контакта. В большинстве случаев на этих операциях используют шлифование.

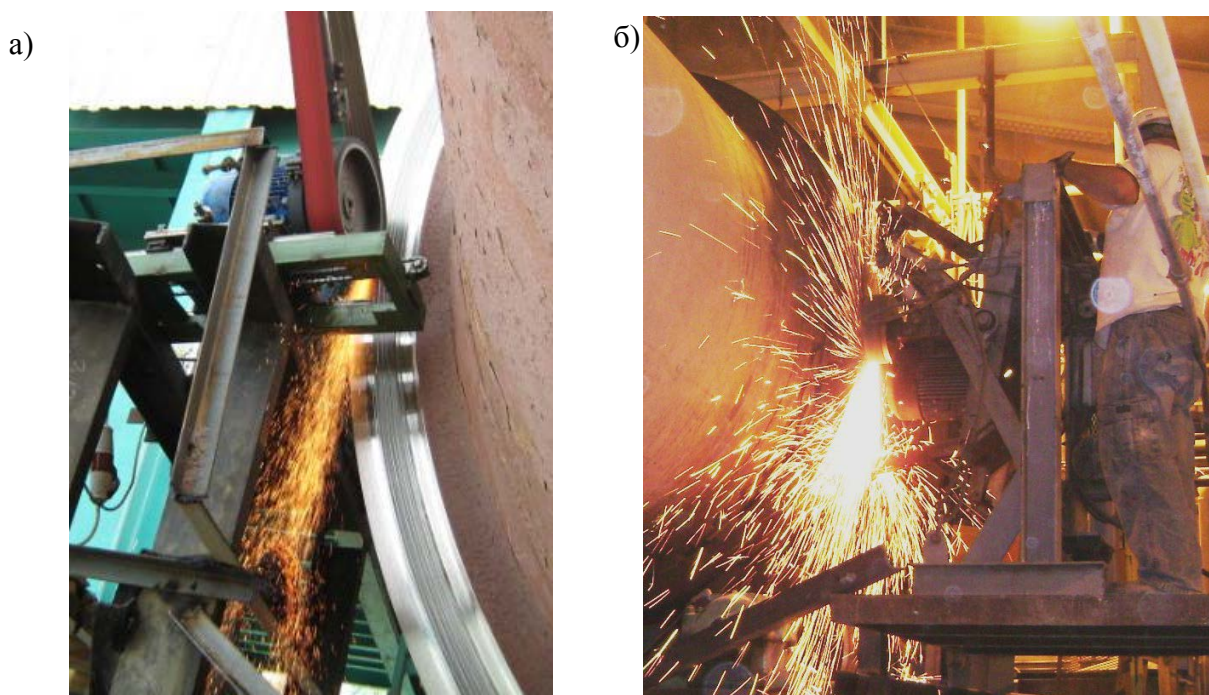


Рис. 2. Применение переносных станков при обработке бандажей вращающихся печей: а) шлифование торцевой поверхности бандажа станком компании ЗАО ММК "Мосинтраст" [54]; б) обработка компанией «Rotary service company» [149] поверхности катания бандажа печи

Для этого выбирают такую конструкцию переносного станка, которая способна компенсировать связанные с особенностями бесцентрового вращения бандажа с погрешностями формы воздействия на инструмент. При этом параметры обработки подбирают эмпирически. Для выполнения более сложной операции исправления погрешностей формы бандажа эмпирического опыта уже недостаточно. А использование теоретических рекомендаций для выбора

режимов и параметров обработки не всегда возможно, поскольку они, как правило, носят частный характер.

Этим объясняется отсутствие в открытой печати и электронных источниках информации сведений о достигнутых результатах применения мобильных технологий для исправления погрешности формы бандажей в процессе функционирования вращающихся печей. С другой стороны, повышенная ответственность таких технологических операций, невозможность пробной обработки, требуют специальных подходов для выбора режимов резания, что определяет необходимость и актуальность теоретического обоснования возможностей восстановительной обработки для исправления погрешностей формы бандажей.

Оно осложняется тем, что упругость бандажа, опорных узлов, станка и, наконец, упругие и тепловые деформации корпуса вращающейся печи (имеющего многоопорное бесцентровое базирование) существенно влияют на результат, а в некоторых случаях даже исключают саму возможность механической обработки подвижных деталей работающего технологического оборудования. Поэтому моделирование таких нелинейных взаимосвязанных явлений затруднительно.

Вместе с тем невозможно сделать обоснованные выводы, используя только одностороннее представление о таком сложном технологическом процессе. Например, большинство современных теоретических исследований основано на рассмотрении влияния только геометрических связей на формообразование бандажа. При этом приходится пренебрегать влиянием упругости и особенностями обработки в разных точках пути резания. Поэтому остается неясным как изменяются при этом технологическом процессе контактная прочность поверхности качения и перемещения корпуса вращающейся печи.

Таким образом, обоснование возможностей восстановительной обработки для исправления погрешностей формы бандажей с учетом ее влияния на напряженно-деформированное состояние материала на поверхности катания бандажа и ролика и девиации корпуса вращающейся печи обладает новизной и представляет интерес, как с практической, так и с теоретической точек зрения.

Представленная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова.

**Целью работы** является повышение точности восстановительной обработки переносным технологическим оборудованием профиля бандажа вращающейся печи путем научно обоснованного выбора геометрических параметров, определяющих 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.

**Объектом исследования** является 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 «Научоемкие 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 2018г.

**Публикации.** По теме диссертационной работы 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.

В работах, опубликованных в соавторстве личный вклад соискателя является доминирующим (разработка моделей и программ, исследование, обработка и анализ результатов, оформление результатов и формулирование выводов), конфликт интересов соавторов отсутствует.

**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 страниц приложений.

## **1. Технологические аспекты функционирования опорных узлов вращающихся печей**

### **1.1. Параметры контакта и особенности конструкций опор вращающихся печей**

Опорные узлы вращающихся печей состоят из фундамента, рамы, корпусов с подшипниками, оси с закрепленным на ней опорным роликом, бандажа с крепежными и регулировочными деталями и корпуса печи (подбандажной обечайки) (рис. 1). Рассмотрим влияние этих узлов на взаимодействие бандажа и опорных роликов.

Прежде всего, погрешность расположения поверхностей качения бандажа и ролика будет зависеть от жесткости основания и допущенных при строительстве фундамента и монтаже опорных рам отклонений от проектных отметок. Поэтому при сооружении опорных фундаментов на каждой верхней их плоскости для обеспечения точности установки оборудования закладывают специальную металлическую пластинку, на которой с помощью теодолита наносится продольная ось печи. Эта отметка используется при установке опорных рам на пакетах из установочных подкладок. Пакеты необходимы для выверки положения рамы нивелиром [103]. Количество подкладок в пакете не более 5 штук. Высота пакета не более 100 мм. Расстояние между пакетами не больше 800 мм. После подливки бетоном анкерных болтов и их затяжки (как только бетон наберет проектную прочность) подкладки в пакетах соединяются между собой электросваркой. Отклонения рамы от проектных размеров и привязок проверяют инструментальной выверкой и сравнивают их с допускаемыми (табл. 1.1).

Эти отклонения опоры могут сохраняться на протяжении всего нормативного срока службы бандажа (19-20 лет), если в конструкции рамы и фундамента отсутствуют скрытые дефекты (сварки, металла и бетона) и выполняются правила эксплуатации печи [46, 78, 88, 103].

При выполнении этого условия особенностями конструкции каждого основания, влияющими на контактное взаимодействие, могут являться только упругие деформации (связанные с погрешностями изготовления) отдельных конструктивных элементов опорной рамы.

**Допуски при изготовлении бандажей (выборка из ОСТ 22-170-87) и монтаже вращающихся печей обжига портландцементного клинкера (выборка из СН 208-62)**

Проверяемый параметр	Допуск
<b>1. Фундаментные рамы</b>	
Отклонение высотной отметки каждого угла фундаментной рамы от расчетной, мм	±1
Отклонение расстояния между соседними фундаментными рамами по поперечным осям, мм	±5
Отклонения от общего расстояния от оси первой рамы до оси последней рамы, мм	±20
Смещение продольных осей фундаментных рам от вертикальной осевой плоскости печи, мм	до 2
<b>2. Роликовые опоры</b>	
Уклон образующей ролика, мм	±0,1 на 1м длины
<b>3. Корпус печи</b>	
Отклонение длины окружности обечаек, мм	±6 на каждый метр
Отклонение овальной обечайки толщиной, мм:	
20-36мм	0,005 диаметра корпуса
36-45мм	0,003 диаметра корпуса
45-60мм	0,002 диаметра корпуса
Прогиб, местные выступы и смещения кромок внутри обечаек и секций, а также сварочных швов, мм	До 3
<b>4. Бандажи</b>	
Неконцентричность цилиндрических поверхностей бандажа (внутренней и наружной), мм	1
Непараллельность торцовых плоскостей бандажа прямоугольного сечения, м	1:5000 наружного диаметра бандажа
Овальность по наружному диаметру, мм	
до 4000 мм	2,0
от 4000 мм до 5500 мм	2,5
от 5500 мм до 6100 мм	3,0
свыше 6100 мм	3,5
Предельное отклонение наружного диаметра	$h12$
Шероховатость поверхностей катания, мкм	$Ra$ 6,3-12,5
Осевое биение бандажа при вращении печи, мм	до 3
Превышение металла усиления сварного шва над поверхностью катания, мм	до +1

Опорные ролики с подшипниками устанавливаются на рамы по проектным размерам. При правильном положении роликов на одной опоре стальная линейка, наложенная на их торцевые поверхности, должна касаться этих поверхностей по

всей длине наложения, а отвес, опущенный с середины расстояния между поверхностями роликов должен совпадать с рисками, фиксирующими ось печи.

Эти условия выполняются только в начальный период эксплуатации печи. Со временем возникают погрешности расположения оси вращения корпуса печи. Допускаются ее отклонения от прямой линии в пределах 3...5 мм в зависимости от расстояния между опорами и толщины обечайки [7]. Эти погрешности связаны как с тепловыми деформациями корпуса, так и с износом поверхностей качения бандажей и роликов, цапфы и вкладышей подшипников скольжения. Их можно компенсировать только смещением опор (вместе с осью и роликом) относительно фундаментной рамы.

Для этого на раме предусмотрены специальные упоры. Следует учитывать, что возможность выполнения этой регулировки зависит от диаметра корпуса печи. При больших размерах воздействия от упоров на корпуса подшипников будет недостаточно для преодоления нагрузки на них от корпуса печи и потребуется использование дополнительных домкратов [78].

Кроме того, для вращающихся печей на опорах с подшипниками скольжения изменение положения роликоопор используют для регулирования поступательного перемещения корпуса печи относительно роликов. Смещение опор при этом изменяет распределение нагрузки между ними, увеличивает сопротивление движению корпуса и износ поверхностей качения бандажей и роликов. Поэтому эта операция выполняется по определенным правилам [46], а ее результаты контролируются по температуре подшипников и данным геодезической съемки. Такую информацию получают также при периодических инспекциях печи для контроля ее эксплуатационного состояния (приложение 1, рис. П.1.).

Бандажи предназначены для передачи на опоры нагрузок от корпуса печи и обеспечения при этом отчасти (ввиду низкой изгибной жесткости корпуса) его центрирования на опорных роликах. Они должны быть связаны с корпусом печи таким образом, чтобы представлять с ним одно целое звено, в котором отсутствуют относительные движения, как при проворачивании холодной печи,

так и при установившемся тепловом режиме [95]. Поэтому по способу соединения с корпусом печи бандажи подразделяют на два типа: плавающие – тип П и вварные – тип В (табл. 1.2 и рис. 1.1).

Таблица 1.2

**Параметры плавающих и вварных бандажей вращающихся печей**

№	Диаметр корпуса печи	Тип бандажа	D	D <sub>1</sub>	b	Масса, кг не более	t	B
1	2500	П	3100	2644	500	8100	-	
		В	3050	2500	500	9800	45	
					400	6500	30	
2	3000	П	3700	3144	550	12900	-	
		В	3600	3000		11940	45	
3	3300	П	3900	3452	550	11120	-	
		В	3950	3300		15500	45	
4	3600	П	4300	3764	700	18200	-	
			4310		600	16300	-	
		В	4250	3600	600	18500	45	
					700	21300		
6	4000	П	4850	4184	800	29700	-	
		В	4600	4000	600	18200	40	
			4750		800	31500	50	
7	4500	П	5470	4760	900	40400	-	
		В	5340	4500		58600	60	1500
8	5000	П	6100	5300	1000	56200	-	
			6250	5360	1100	70700	-	
		В	5950	5000	900	65500	60	1500
					1000	72000	80	1600
10	5600	П	6800	5960	1000	66300	-	
12	6400	П	7750	6800	1200	79600	-	
13	7000	П	8450	7450	1350	102800	-	
						132400	-	

Для бандажей типа П (рис. 1 и 1.1а) является характерным наличие зазора между внутренним диаметром бандажа и наружной поверхностью подбандажной обечайки, устраняемого при монтаже различными способами [51]. Увеличенный зазор приводит к проворачиванию бандажа и изнашиванию регулировочных деталей (прокладок и башмаков), а также к деформациям подбандажной обечайки и разрушению футеровки. При уменьшении зазора ниже допустимых пределов в соединении возникает избыточный натяг, который приводит к деформации обечайки и в отдельных случаях к разрушению футеровки.

Кроме этого для бандажей типа П важной особенностью, влияющей на контактное взаимодействие, является необходимость регулировки осевого биения в процессе монтажа и его периодического контроля в процессе эксплуатации.

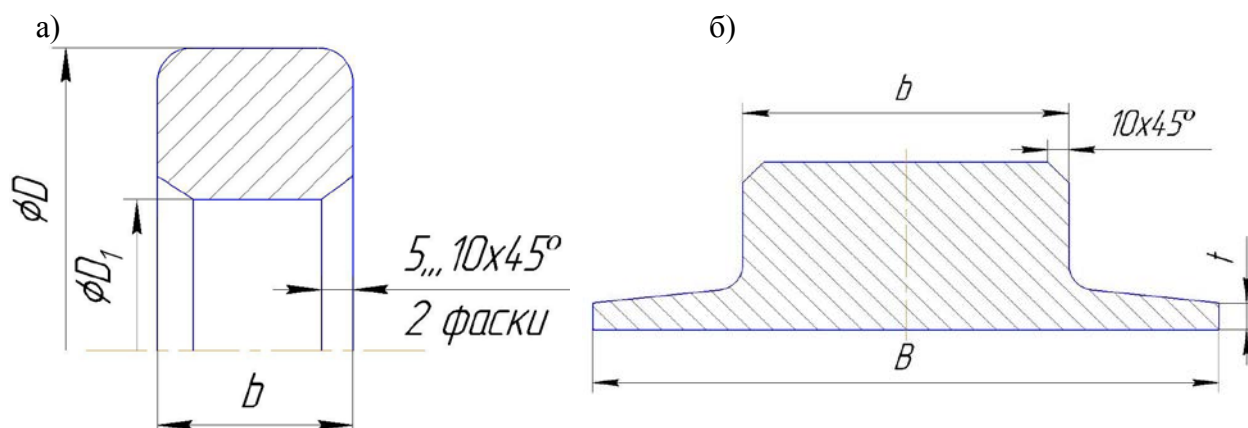


Рис. 1.1. Геометрические параметры поперечных сечений бандажей: а) тип «П»; б) тип «В»

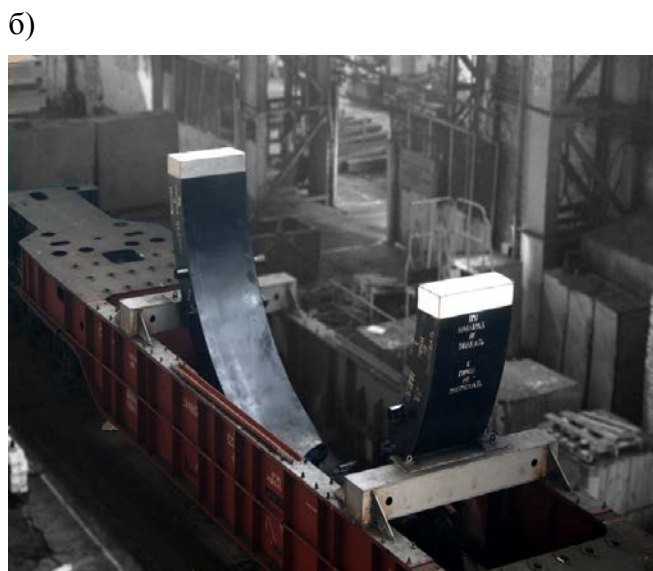
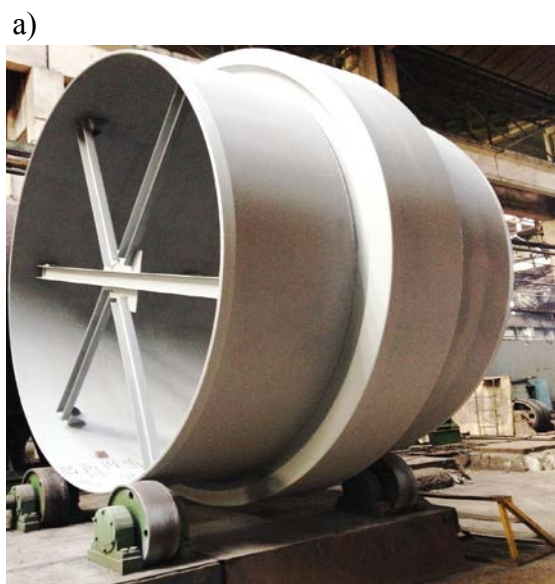


Рис. 1.2. Общий вид бандажей после изготовления: а) секция корпуса печи 4×90 м с бандажом типа В (ОАО Волгоцеммаш); б) сегмент бандажа  $\varnothing 7750$  мм (ОАО "ЭЗТМ")

Бандажи типа В (рис. 1.1б и 1.2а) изготавливают в двух исполнениях. Они позволяют существенно повысить надежность опорного узла, исключить потери на трение и износ деталей, а также увеличить жесткость корпуса печи и срок службы ее футеровки.

Вварные бандажи поставляются с приваренными околобандажными обечайками (рис. 1.2а), причем бандажи с наружным диаметром до 4950 мм включительно изготавливают целыми кольцами, а свыше этого размера, как правило, из двух частей (рис. 1.2б) свариваемых на цементном заводе электрошлаковой сваркой [51].

Бандажи типа П насаживаются на подбандажные обечайки и центрируются в процессе стендовой сборки корпуса в укрупненные блоки. Сборка корпуса из блоков должна обеспечить прямолинейность геометрической оси вращения и совпадение свариваемых кромок, смещение которых не должно превышать 3 мм [103].

Таким образом, номинальное эксплуатационное состояние опорного узла вращающейся печи определяется его плавной без вибраций и шума работе, при отсутствии потеков масла из подшипников и их температуре не выше  $70^{\circ}\text{C}$ . При этом поверхности качения бандажа и ролика имеют цилиндрическую форму с одинаковой шероховатостью по всей поверхности контакта, задиры и завальцовка кромок ("грибы") отсутствуют, а посадочный зазор бандажа типа П при установившемся тепловом режиме печи равен нулю [78].

Такое состояние является следствием правильной выверки вращающейся печи, при которой выполняются следующие условия: геометрическая ось не нагруженного корпуса совпадает с осью его вращения и является прямолинейной и неподвижной, геометрические оси опорных роликов параллельны друг другу и оси вращения корпуса печи, углы наклона к горизонту осей вращения роликов и печи совпадают с углом наклона фундаментных рам.

Тогда пятно контакта между бандажом и опорными роликами имеет форму прямоугольника, большая сторона которого равна длине бандажа. При изменении взаимного положения рабочих поверхностей форма и размеры пятна контакта изменяются [135], а вместе с этим появляется неравномерность распределения по нему нагрузки, скольжение и связанный с ним износ. Влияние этих факторов на функционирование вращающейся печи и их проявления при восстановительной обработке бандажа еще недостаточно изучены.

## **1.2. Тенденции совершенствования технологии монтажа и ремонта опорных узлов вращающихся печей**

Бандажи и опорные ролики являются тяжелонагруженными и наиболее часто ремонтируемыми деталями вращающихся печей. Рассмотрим причины,

вызывающие необходимость ремонта и возможности их устранения перед началом механической обработки переносными станками.

Сначала по данным литературных источников выполним анализ повреждений бандажей (табл. 1.3). Выясним причину возникновения каждого из них и возможность ее устранения.

Таблица 1.3

**Причины необходимости применения мобильных технологий для обработки бандажей вращающихся печей**

№	Вид повреждения	Причина повреждения	Идентификация	Влияние на функционирование	Устранение	Вид обработки
1	Равномерное уменьшение толщины поперечного сечения бандажа и возникновение при упругих деформациях и переменной нагрузке погрешности формы	НПЭ	Замером	СДДКП	ВПр ЗБ	–
2	Погрешность формы (овальность, огранка, волнистость и т.п.) при неравномерном уменьшении толщины бандажа	НПЭ	СРКРБ	СДДКП, ДИН	ВПр ТРО ЗСК	В
3	Дефекты на поверхности катания (загрязнения, раковины, сварка)	НПЭ, СД	Визуально	Неявно, ВБ, ПУ.	ЗПК	П
4	Трещины, раковины (при отслаивании материала), вмятины на поверхности катания	НПЭ	Визуально	Неявно, ВБ.	ВПр ТРО	П
5	Разрушение по поперечному сечению	НПЭ, СД	Визуально	Остановка печи	ВПр РКБ	В
6	Выкрашивание	НПЭ	Визуально	ВБ	ВПр ЗПК	П
7	Отклонение от цилиндричности (бочкообразность, конусность), изломы, отслаивание и завальцовка кромок	НПЭ	Замером	СДТС	ВПр РКБ	В
8	Расположенные параллельно друг другу периодические вмятины по всей длине пятна контакта	НПЭ.	Визуально	ВБ, ДИН.	ВПр	В
9	Погрешности формы и повреждения поверхности катания при монтаже или ремонте	НПМР	СРКРБ	СДДКП, ДИН.	–	В

Примечание: СДДКП - увеличение сопротивлений движению из-за появления девиаций корпуса печи. ДИН - дополнительное инерционное нагружение опор. ВБ - вибрации. ПУ - периодические ударные нагрузки. СДТС - увеличение сопротивлений движению из-за повышения трения скольжения, ВПр - выверка печи и роликов. РКБ - ревизия крепления бандажа. ЗБ - замена бандажа. ЗСК - замена секций корпуса. СРКРБ - сравнением результатов контроля радиального биения. НПЭ, НПМР - нарушение правил соответственно эксплуатации, монтажа или ремонта. СД - скрытые дефекты. ЗПК - защита поверхностей качения. ТРО - соблюдения температурных режимов обжига. В - восстановительная. П - профилактическая.

Первые два вида повреждений связаны с износом поверхности катания бандажа [78]. При этом рассматривается только изменение формы и размеров



поперечного сечения (профиля) бандажа. Это значит, что по длине бандажа сечения изнашиваются одинаково. Следовательно, такой износ не связан с погрешностями расположения бандажа и роликов. Тогда причиной его появления могут быть только следующие факторы: скольжение поверхностей контакта и (или) их загрязнение частицами абразива.

Существенный износ возникает при нарушении чистого качения поверхностей и появления относительного движения между ними. Такое скольжение может быть связано как с повышенным сопротивлением движению в подшипниках опоры (нарушение равномерного распределения реакций в опорах печи), так и с нарушением посадки плавающего бандажа на корпусе печи, приводящей к увеличению осевого биения.

Эти факторы также, как и наличие абразива на поверхностях контакта можно определить при регулярной инспекции функционирования вращающейся печи (приложение 1, рис. П.1.) и поэтому они относятся к нарушению правил ее эксплуатации.

Третий вид повреждения (табл. 1.3) отличается тем, что, во-первых, связан с влиянием скрытых дефектов: неоднородность механических свойств материалов бандажа и сварных швов, усадочные раковины, флокены, трубчатые поры, непровары, трещины в сварном шве, металлургические дефекты в литье и т.д. [78, 85]. Они возникают при изготовлении, монтаже или ремонте бандажей. При этом дефекты сварных швов встречаются в 36 % случаев, а дефекты литья при изготовлении бандажей только в 24 % [43].

Во-вторых, эти повреждения не нарушают профиль бандажа и во многих случаях не влияют на движение печи. Механическая обработка такой поверхности бандажа необходима для предупреждения появления под влиянием рассмотренных дефектов трещин и других повреждений. Поэтому ее можно назвать профилактической в отличии, например, от обработки при повреждении 2, когда необходимо восстановить форму профиля бандажа.

Причинами повреждений 4, 5 и 6 (табл. 1.3) является превышение номинальной нагрузки на материал бандажа в зоне пятна контакта. Она может

быть связана, прежде всего, с тепловыми деформациями корпуса печи, которые нарушают прямолинейность оси вращения и вызывают неравномерное распределение реакций между опорами печи.

Установлено [8], что реакции опор, возникающие вследствие местного искривления геометрической оси печи, в 2...3 раза превышают расчетные нагрузки. Анализ разрушений бандажей показал, что наиболее часто аварии происходят на вторых опорах с холодного конца и предпоследних на горячем конце [9, 86]. Подсчитано, что в 40 % случаев это связано с нарушением правил эксплуатации печей [43].

При постоянном присутствии на поверхности катания жидкости и мелких трещин возникает усталостное выкрашивание (рис. 1.3). Его развитию препятствует износ этих поверхностей. Бандаж подлежит замене при износе или выкрашивании более 0,1 толщины бандажа в радиальном направлении, а также при выкрашивании более 0,1 площади всей его опорной поверхности.

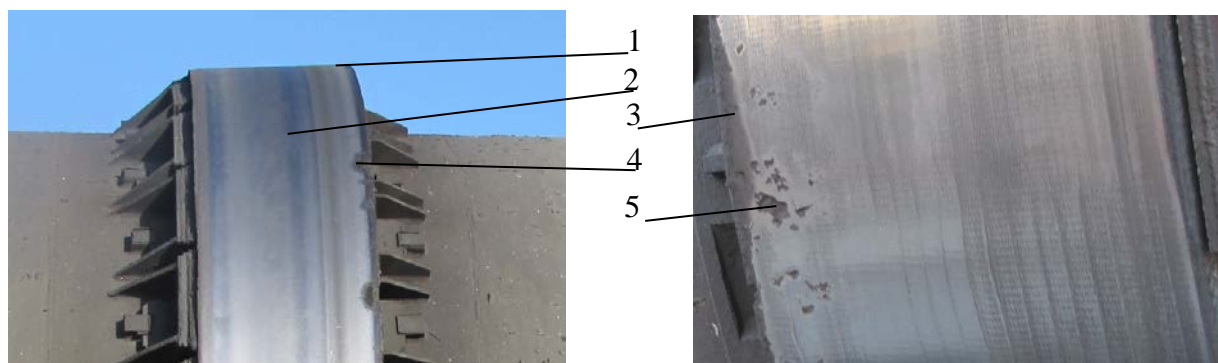


Рис. 1.3. Повреждения бандажей типа П вращающейся печи 5×185 м: 1- конусность; 2 - следы неравномерного износа; 3, 4 - кромочные изломы; 5 - очаг выкрашивания

При сочетании нескольких негативных факторов (превышении номинальных прогибов и реакций в опорах, существенных тепловых напряжений и избыточном натяге (для бандажа типа П)) возможно развитие сквозных трещин и разрушение бандажа по поперечному сечению.

Такой бандаж или заменяют новым или ремонтируют, не снимая его с печи. В первом случае производство работ включает разрезание корпуса печи, снятие бандажа с подбандажной обечайкой, установку новой подбандажной обечайки с новым бандажом и приварку ее к корпусу печи [36]. В зависимости от

организации работ такой ремонт может длиться от 12 до 60 суток и является наиболее трудоемким и дорогостоящим [78].

В большинстве случаев ремонт трещин выполняют по второму варианту, т.е. производят заварку трещин, не снимая бандаж с корпуса печи. При этом сначала фиксируют части бандажа, разъединенные трещиной. Затем газопламенной резкой выполняют разделку V или X-образной формы кромок с последующим шлифованием стенок. Чаще всего трещины в бандаже исправляют с помощью ручной электродуговой сварки покрытыми электродами непрерывно и одновременно два сварщика с проковкой каждого слоя [49]. Общая длительность ремонта сквозной трещины в бандаже вращающейся печи диаметром 5×185 м составляет от 7 до 12 суток [43].

Следует отметить, что при разделке кромок X-образной формы возникает необходимость вырезки окна в подбандажной обечайке. В дальнейшем после его заварки сварные швы ослабляют обечайку, являясь источниками концентрации напряжений. При V-образной форме разделки кромок сварка вызывает остаточные деформации бандажа и, следовательно, погрешность его формы.

Седьмой вид повреждений (табл. 1.3) встречается наиболее часто [46, 78, 85]. Причиной является нарушение номинального расположения поверхностей катания. Изменение при этом пятна контакта вызывает неравномерный износ этих поверхностей, задиры, завальцовку и изломы кромок (рис. 1.3 и 1.4). Значительно возрастает потребляемая мощность привода печи, она тяжело регулируется, срок службы бандажей и опорных роликов сокращается в 3-4 раза [78].

При превышении допустимого осевого биения бандажа (см. табл. 1.1) он принимает бочкообразную, а опорный ролик седлообразную форму. Неравномерный износ при нарушении параллельности осей вращения вызывает конусность продольного сечения бандажа и опорного ролика (рис. 1.3).

Во всех таких случаях концентрация нагрузки возле торца бандажа приводит к отслоению материала поверхности катания, завальцовке кромок и образованию трещин параллельно торцу бандажа, увеличение которых заканчивается краевым изломом (рис. 1.3 и 1.4).

Причиной повреждения 8 (табл. 1.3) являются периодические ударные нагрузки [18, 146]. При номинальном расположении поверхностей катания они вызывают пластические деформации по всему пятну контакта. Поэтому такое повреждение на поверхности катания бандажа имеет вид параллельных прямых вмятин, расположенных с постоянным шагом. Как правило, оно является результатом погрешностей регулировки (или износа) зубчатого зацепления привода печи или поворота роликов для создания осевого усилия на корпус печи. При выполнении регулярного сервисного обслуживания такие повреждения не возникают.

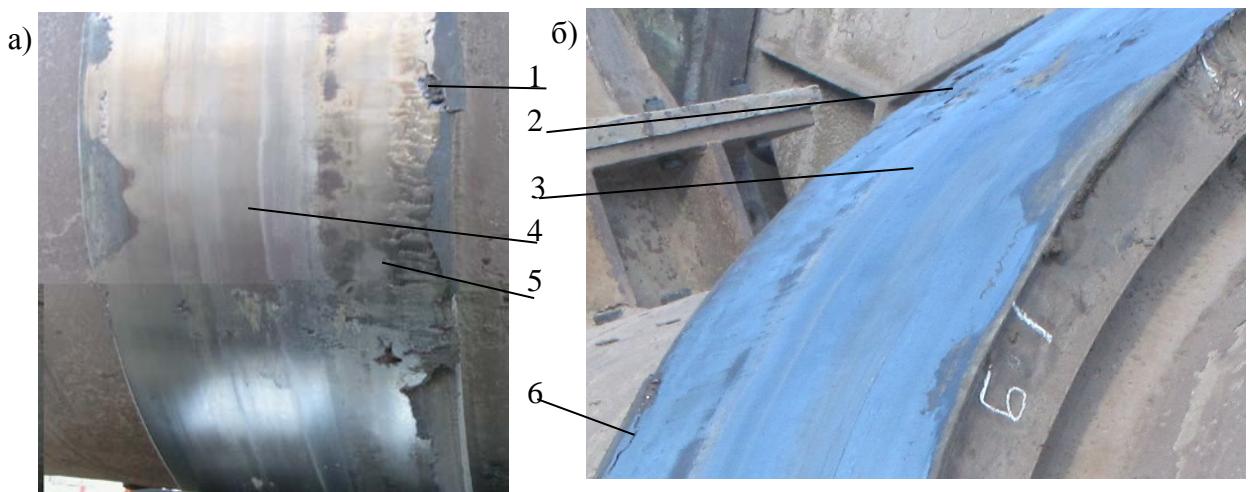


Рис. 1.4. Повреждения поверхностей катания бандажей типа В вращающейся печи 5×185 м: 1- отслаивание материала на торцевой поверхности бандажа; 2 - неровности в месте сварки; 3,4 - следы неравномерного износа; 5 - завальцовка кромок ("грибы"); 6 - трещина кромочного излома

Наконец, причины повреждения 9 (табл. 1.3) отличаются тем, что они являются или следствием ремонта бандажа или связаны с погрешностями при его монтаже (рис. 1.4). В первом случае негативные результаты ремонта подобны повреждениям, возникающим при эксплуатации печи и погрешности формы профиля при заварке сквозной поперечной трещины.

Во втором случае погрешность формы профиля бандажа может быть связана со смещением на 1...3 мм сегментов бандажа по диаметру при их соединении сваркой [43].

Из результатов выполненного анализа следует обратить внимание на то, что причиной повреждения только в двух из девяти рассмотренных случаев (табл. 1.3)

являются скрытые дефекты. В остальных случаях отказы функционирования оборудования зависят от соблюдения правил его эксплуатации.

Только для первого из рассмотренных повреждений применение мобильной технологии обработки не рационально. В пяти случаях необходима восстановительная обработка бандажа, а в трех других достаточно профилактической обработки поверхности катания переносными станками.

Таким образом, современные тенденции совершенствования технологии монтажа и ремонта, способствующие улучшению эксплуатационного состояния вращающихся печей и удлинению их межремонтного цикла, связаны с организацией регулярной инспекции состояния опорных узлов, профилактической обработкой бандажей и опорных роликов переносными станками и сочетанием возможностей мобильной технологии восстановительной обработки и методов исправления положения геометрической оси вращения печи во время ее эксплуатации.

### **1.3. Особенности конструкций переносных станков**

В условиях рыночной экономики все более возрастает конкуренция в сфере технического обслуживания и ремонта технологического оборудования. Только в нашей стране по данным открытых печатных и электронных источников информации насчитывается больше десятка малых и средних предприятий, оказывающих сервисные услуги по обработке бандажей и роликов вращающихся печей [40, 44, 45, 54, 59, 60, 142].

В зарубежных странах известны примеры использования переносных станков для обработки бандажей вращающихся печей фирмами Турции, Австралии, Германии и других стран [104, 109, 140, 141, 143-149, 151, 152]. Мобильные технологии активно развивает лидер сервисных услуг в цементной промышленности Phillips Kiln Services [18]. Поэтому можно сказать, что они находят применение во многих странах мира [146].

Больше всего известных примеров практической реализации мобильных технологий связано с обработкой поверхности катания опорных роликов и торцевой поверхности бандажей вращающихся печей (рис. 2а). В этих случаях

конструкции переносных станков примерно одинаковы и не имеют существенных особенностей. Как правило, они содержат направляющую, закрепляемую на фундаменте опоры печи параллельно обрабатываемой поверхности. На направляющей устанавливают с возможностью поступательного движения суппорт или каретку с приводом поперечной подачи. Эти операции выполняются как шлифованием, так и точением.

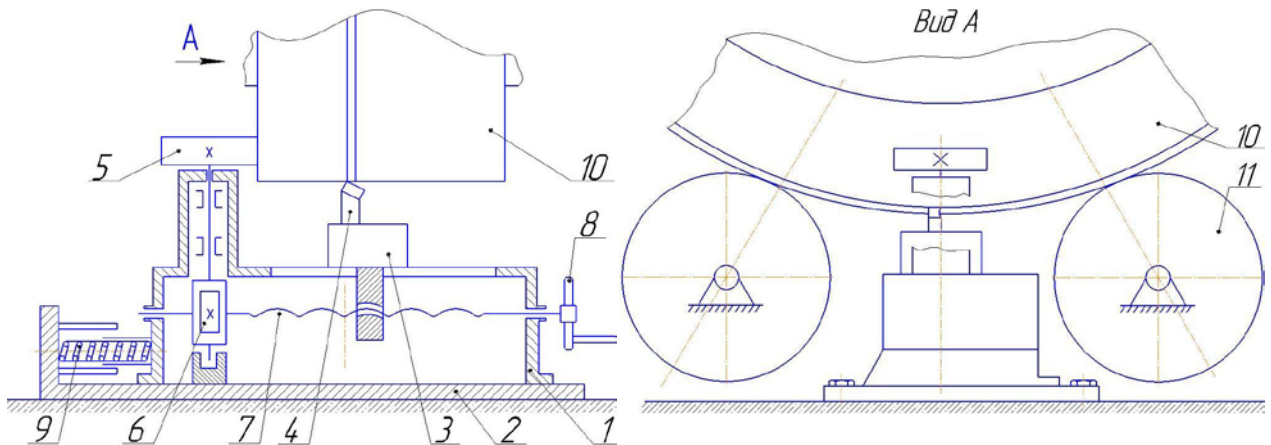


Рис. 1.5. Устройство фирмы Союзремонт (СССР) для проточки бандажей и роликов вращающейся печи: 1 - основание станка; 2 - станина; 3 - суппорт; 4 - резец; 5 - ролик; 6 - червячное колесо; 7 - ходовой винт; 8 - рукоятка; 9 - пружина; 10 - бандаж; 11 - опорный ролик

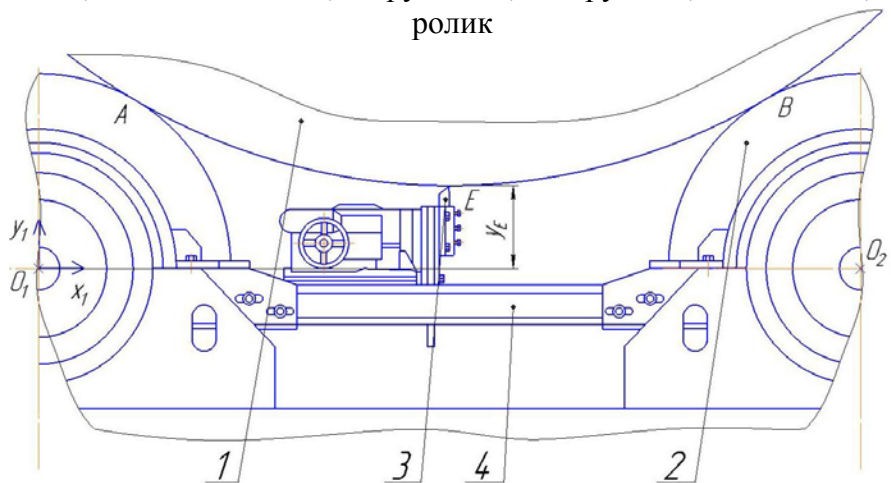


Рис. 1.6. Универсальный встраиваемый станок УВС-М (БГТУ им. В.Г. Шухова) при расположении между опорами вращающейся печи: 1 - бандаж; 2 – опорный ролик; 3 – инструмент; 4 - сменные технологические наладки

Для обработки поверхности катания бандажа такую конструкцию можно использовать при установке станка между опорами бандажа. Ее прототипом является устройство (рис. 1.5), разработанное для промышленности строительных материалов СССР организацией Союзремонт. В этой конструкции осевое перемещение корпуса печи не влияет на обработку бандажа (табл. 1.4). Постоянный контакт резца с обрабатываемой поверхностью и продольная подача



синхронная со скоростью вращения бандажа обеспечиваются фрикционной передачей, ведущим звеном которой является бандаж [78]. В настоящее время для решения этой задачи в универсальном встраиваемом станке УВС-М используется промышленный электропривод (рис. 1.6).

Крайне неудобное расположение между опорами (трудоемкий монтаж; ограниченный доступ для обслуживания, управления и контроля обработки; невозможность применения на опорах с упорными роликами; потенциально опасные подвижные части оборудования и высокая температура) определило необходимость расположения переносного станка над одной из роликоопор рядом с бандажом.

В этом случае обработка осложняется влиянием бесцентровой схемы базирования бандажа на опорных роликах. При этом погрешность формы

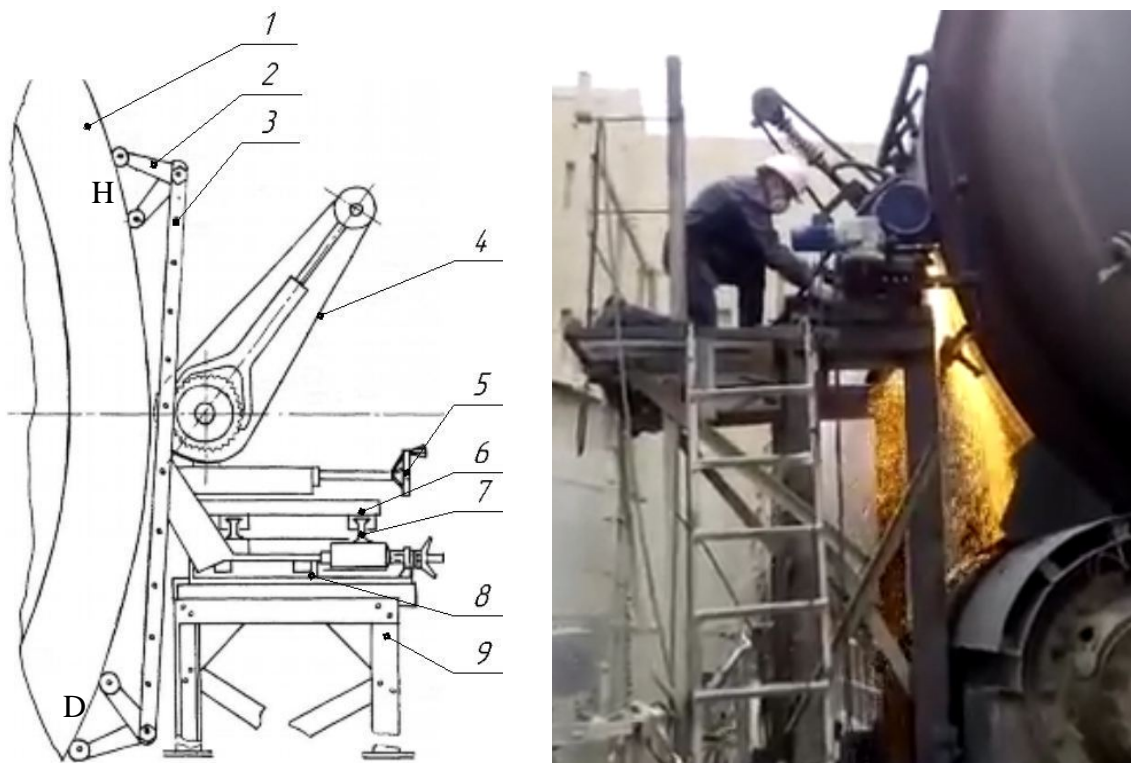


Рис. 1.7. Ленточный шлифовальный станок ЗАО ММК "Мосинтрат" [71] и встречное круглое шлифование бандажа вращающейся печи: 1 – бандаж; 2 – копирующая опора; 3 – рама; 4 – бесконечная абразивная лента; 5 – штурвал; 6 – суппорт; 7 – направляющие полозья; 8 – демпфирующий стол; 9 – стойка-конверт

бандажа, загрязнения или повреждения поверхности катания изменяют ее движение и контакт с инструментом. Поэтому в конструкции станка должно быть

предусмотрено устройство, обеспечивающее постоянный контакт инструмента с поверхностью катания.

Фирма ЗАО ММК "Мосинтраст" использует для этого копирующее устройство станка [71], которое состоит из рамы 3 и четырех копирующих опор 2 (рис. 1.7). К демпфирующему столу 8, который находится на стойке-конверте 9, крепится опорная рама с направляющими ползьями 7. На них устанавливается суппорт 6. Поперечная подача осуществляется вручную вращением штурвала 5. При шлифовании бандажа 1 копирующие опоры 2, упираясь в обрабатываемую поверхность, катятся по ней, повторяя ее неровности. За счет зависимых амортизаторов демпфирующего стола 8 обеспечивается постоянный контакт копирующих опор с поверхностью бандажа 1, а толчки и вибрации, воздействующие на бесконечную абразивную ленту 4, происходят с уменьшенной частотой и амплитудой.

Подобный принцип реализован в шлифовальных станках ряда отечественных компаний [44, 45, 59, 142]. Эти конструкции объединяет то, что в них при продольной подаче перемещается относительно копирующего устройства только суппорт.

В переносных станках УВС-01 (БГТУ им. В.Г. Шухова) копирующее устройство перемещается вместе с суппортом (рис. 1.8). Такая конструкция называется динамически самоустанавливающийся суппорт (ДСС) [65, 66].

Станок УВС-01 с ДСС [66] содержит неподвижную направляющую 9, несущую суппорт 7 (рис. 1.8). Он оснащен пинолью 6, которая имеет возможность осевого выдвижения под действием пружины. На конце пиноли 6 шарнирно закреплена роликовая тележка 4, снабженная механизмом осевого перемещения и двумя опорными роликовыми блоками 3 контактирующими с обрабатываемой поверхностью 1.

Конструкция роликовой тележки 4 такова, что воображаемые линии, соединяющие центры присоединительных шарниров роликовых блоков 3 и шарнира тележки, образуют между собой равнобедренный треугольник с тупым углом при вершине. В плоскости этого треугольника располагается инструмент с



возможностью осевого перемещения вдоль прямой проходящей через шарнир роликовой тележки 4.

В отличие от всех рассмотренных выше конструкций в переносных станках

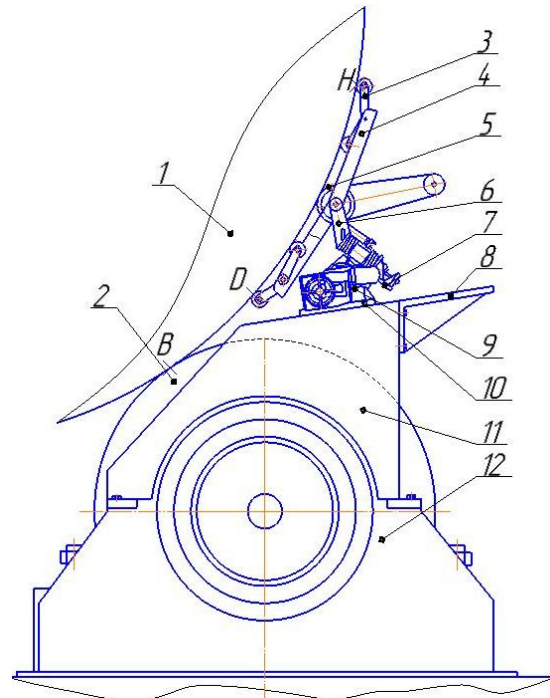


Рис. 1.8. Универсальный встраиваемый станок УВС-01 (БГТУ им. В.Г. Шухова) с динамическим самоустанавливающимся суппортом (ДСС): 1 – бандаж; 2 – опорный ролик; 3 – опорный роликовый блок; 4 – роликовая тележка; 5 – инструмент; 6 – пиноль; 7 – несущий суппорт; 8 – монтажная площадка; 9 – направляющая; 10 – опорная стойка; 11 – сменная технологическая наладка; 12 – корпус подшипника роликосопоры

зарубежных компаний направляющую суппорта размещают, в основном, на звене, которое совершает вращательное движение (рис. 1.9).

Компания Phillips Kiln Services LTD [18, 146] обработку поверхности катания бандажей 1 выполняет плоским шлифованием чашеобразным шлифовальным кругом 2 (рис. 1.9). Его привод в шлифовальном станке выполнен вместе с приводом продольной подачи в суппорте 3. Суппорт расположен на направляющей 5, закрепленной на коромысле 4, положение которой с одной стороны определяется воздействием пневмоцилиндра 7 с односторонним ограничителем 6, а с другой опорным роликовым блоком 8, который имеет возможность вращательного движения вокруг направляющей 5. Инструмент 2 находится в одной плоскости с роликовым блоком 8.

В подобной конструкции переносного станка компании ThyssenKrupp AG [152] продольная подача суппорта 2 выполняется без изменения положения роликового блока 1.

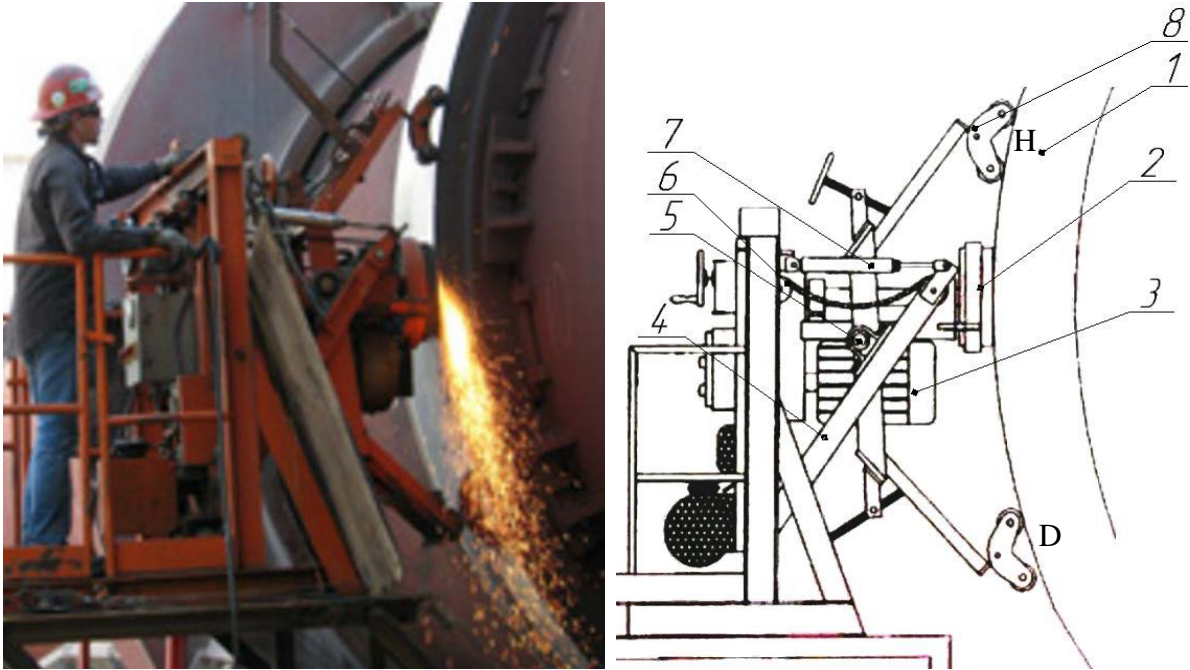


Рис. 1.9. Шлифовальный переносной станок компании Phillips Kiln Services LTD [18]:  
1 – бандаж; 2 – чашеобразный шлифовальный круг; 3 – суппорт; 4 – коромысло; 5 – направляющая; 6 – односторонний ограничитель; 7 – пневмоцилиндр; 8 – роликовый блок

Таким образом, из результата этого анализа следует, что дальнейшее совершенствование конструкций переносных станков связано, прежде всего, с решением следующих задач: 1) снижение трудоемкости и повышение производительности монтажа станка, 2) минимизация числа подвижных звеньев и громоздкости конструкции станка, 3) реализация возможности настройки станка для исправления погрешности формы бандажа.

Одновременное решение указанных задач предложено в конструкции станка [68] состоящего из подпружиненного кронштейна 8, который шарнирно закреплен на корпусах подшипников роlikоопор 10 (рис. 1.10). Кронштейн выполнен в виде плоской рамы, в средней части которой расположены опорные площадки 2 с закрепленной на них направляющей 3, а в верхней части установлен копирующий ролик 7, который контактирует с поверхностью качения бандажа 1 вращающейся печи. По направляющей 3 перемещается продольный суппорт 4, с установленной на нем кареткой 5, на которой закреплена шлифовальная установка 6, содержащая бесконечную абразивную ленту 11.

Благодаря таким решениям упрощается монтаж станка, повышается его надежность (за счет уменьшения количества подвижных соединений) и отсутствует необходимость в сооружении громоздких и металлоемких лесов (рис. 1.7).

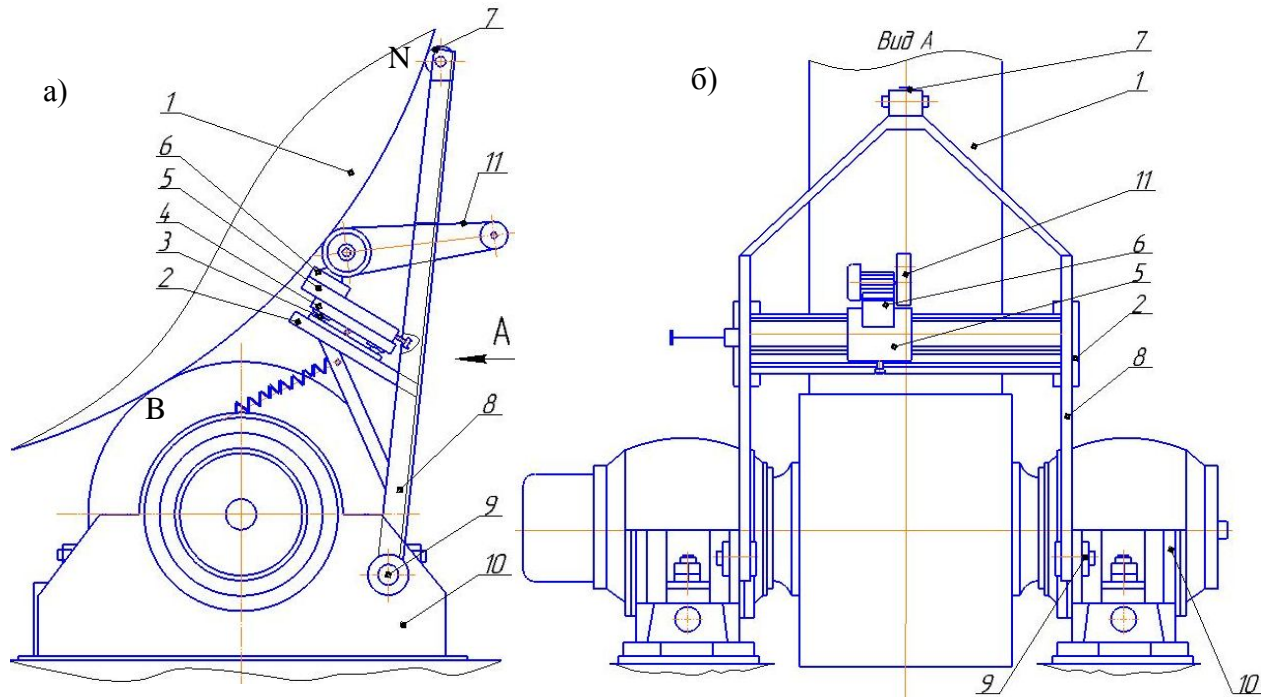


Рис. 1.10. Шлифовальный переносной станок (БГТУ им. В.Г. Шухова) на подвижном кронштейне (СПК): а) общий вид; б) вид станка СПК справа; 1 – бандаж; 2 – опорные площадки; 3 – направляющая; 4 – продольный суппорт; 5 – каретка; 6 – шлифовальная установка; 7 – копирный ролик; 8 – подпружиненный кронштейн; 9 – шарниры; 10 – корпус подшипника; 11 – бесконечная абразивная лента

Необходимо отметить, что на всех рассмотренных выше станках система управления положением инструмента отсутствует. Кроме того, их конструкции можно разделить на группы по следующим принципиальным конструктивным признакам: 1) размещение направляющей продольного привода, 2) способ базирования, 3) расположение инструмента по отношению к поверхностям базирования.

По первому признаку получаем следующие варианты конструкций: 1) направляющая неподвижна (см. рис. 1.6, 1.8); 2) поступательное движение направляющей (см. рис. 1.7); 3) вращательное движение направляющей (рис. 1.9, 1.10).

По второму признаку отличия сводятся к особенностям образования участка поверхности (на котором инструмент взаимодействует с бандажом), расположенного между точками контакта: 1) с опорными роликами (см. рис. 1.6 хорда  $AB$ ); 2) с копирными роликами (см. на рис. 1.7, 1.8, 1.9 хорды  $DH$ ); 3) опорного ролика печи и копирного ролика станка (см. на рис. 1.10 хорда  $BN$ ).

Третий признак позволяет рассматривать одинаковые свойства конструкций для следующих вариантов: 1) перемещение инструмента при обработке изменяет размеры поверхности базирования (см. рис. 1.6); 2) инструмент постоянно располагается в одной плоскости с точками базирования (см. рис. 1.8, 1.9); 3) расстояния между точками базирования и инструментом при обработке непрерывно изменяются (см. рис. 1.10).

Эта классификация переносных станков определяет такие особенности конструкций, влияние которых на восстановительную обработку бандажей исследовано недостаточно и поэтому их необходимо формализовать в расчетных моделях и учитывать при математическом моделировании восстановительной обработки этими станками.

#### **1.4. Научно-технические основы мобильных технологий восстановительной обработки бандажей**

Начало формирования области знаний аффилированных с обработкой крупногабаритных деталей без остановки производства связано с изобретательской деятельностью [1, 2], в результате которой в семидесятих годах прошлого века были изготовлены и начали применяться на практике первые переносные устройства [78]. Обоснование рекомендуемых для них параметров обработки в открытой печати отсутствовало. Оставались неясными способы и режимы восстановительной обработки поверхностей качения бандажей для исправления погрешностей формы.

Поэтому в середине восьмидесятих годов для решения этих задач начались исследования на кафедре «Технологии машиностроения» БГТУ им. В.Г. Шухова [72, 73, 82, 87, 125]. Они основаны на фундаментальных положениях технологии машиностроения, которые получены известными учеными, такими как Корсаков

В.С., Тиме И.А., Балакшин Б.С., Гавриленко А.П., Соколовский А.П., Кован В.М. и другими.

К этой научной базе знаний относятся также работы Дальского А.М., Суслова А.Г., Маталина А.А., Соломенцева Ю.М., Тимирязева В.А., Одинцова Л.Г., Кузнецова А.М., Митрофанова В.Г., в которых рассмотрены вопросы, связанные с точностью формообразования поверхности, а также условия появления погрешностей. Важным ориентиром является теория бесцентрового измерения и шлифования деталей, изложенная в трудах Геббеля И.Д., Ашкиназий Я. М., Хроленко В.Ф., Чернова Б.И., Вайса С. Д., Прохорова А.Ф., Телешевского В.И., Островского М.С., Бржозовского Б. М., Захарова О.В. [14, 15, 17, 84, 105].

Необходимая для исследования восстановительной обработки бандажей и опорных роликов теоретическая и справочная информация об устройстве, основных свойствах, методах расчета, монтажа и ремонта вращающихся печей сконцентрирована в работах Банит Ф. Г., Боганова А.И., Богданова В.С., Дроздова Н. Е., Лоскутова Ю. А., Сапожникова М.Я., Силенок С.Г.

Первые работы в области мобильных технологий Пелипенко Н.А., Погонина А.А., Рязанова В.И., Полунина А.И. и Шрубченко И.В. посвящены разработке переносных станков, исследованию влияния расположения инструмента на формообразование поверхностей бандажа при восстановительной токарной и фрезерной обработке [3, 4, 125, 130, 132].

В работах [72, 79, 87] рассмотрены математические зависимости и геометрические параметры, которые влияют на процесс формообразования поверхности качения бандажа при восстановительной обработке.

Математические модели формообразования поверхности качения бандажа цементной печи построены в работах [125, 130]. Результаты расчета позволяют выбирать параметры обработки поверхности бандажа на станке с динамическим самоустанавливающимся суппортом (ДСС).

В работах Пелипенко Н.А. [72-74] исследованы геометрические параметры, которые влияют на процесс формообразования. Он рекомендует при

восстановительной обработке бандажа с увеличением числа рабочих ходов нелинейно уменьшать глубину резания на каждом ходе.

Кроме того, в работе [72] проанализировано изменение положения бандажа при базировании его на двух опорных роликах в зависимости от изменения радиусов исходного контура в точках контакта с опорными роликами.

Ряд технологических задач по восстановлению крупногабаритных деталей машин без демонтажа в процессе их эксплуатации рассмотрен в работе Погонина А.А. [79]. Им предложена математическая модель самоустанавливающегося суппорта, которая позволяет при статической настройке исходя из отклонений геометрической формы бандажа определить предельные значения регулируемых параметров. Отмечено, что применение данного суппорта более чем в два раза уменьшает влияние исходной погрешности геометрической формы бандажа на параметры точности восстановительной обработки.

Вопросы, связанные с обеспечением точности изготовления крупногабаритных колец путем совершенствования механической обработки рассматриваются в работах Дуганова В.Я. [37, 38], Стативко А.А. [99], Шрубченко М.И. [134], Санина С.Н. [90].

Общей особенностью всех перечисленных выше математических моделей формообразования поверхности качения бандажа является направленность на получение только численных односторонних оценок результатов обработки, которые не позволяют сформулировать рекомендации по выбору общего припуска, обеспечивающего наибольшую точность геометрического восстановления профиля бандажа. При этом необходимость неравномерного распределения припуска по обрабатываемой поверхности во внимание не принимается.

В работах Кузнецовой И.И. [120, 129] представлены результаты исследований по формообразованию поверхностей качения при условии минимизации общего припуска. При этом установлено, что восстановительную обработку овальных бандажей целесообразно производить без использования ДСС за три рабочих хода. Объяснения такого вывода, к сожалению, отсутствуют.

Влияние изменения базирующей поверхности бандажа на формообразование его профиля и девиации корпуса печи в этих работах также не рассматривается.

Вопросы определения технологического обеспечения условий контакта опор технологических барабанов рассмотрены в работах Колобова А.В. [127, 135]. Разработанная автором математическая модель позволяет определить ширину площадки контакта бандажа и ролика, распределение по ней давления и нагрузки, режимы обработки для обеспечения нормативного контакта. Изменение напряжений на пятне контакта при восстановительной обработке бандажа в данных работах не исследовано.

В работах Мурыгиной Л.В. [57, 122] проведено исследование влияния геометрических и технологических параметров на процесс формообразования при бесцентровом ленточном шлифовании на станке с ДСС и сделан вывод о рациональности его использования.

Этот вид обработки имеет преимущественное применение в современном сервисном ремонте бандажей и роликов (см. п. 1.2). Поэтому, представляют интерес работы по бесцентровому шлифованию [14, 15, 17, 108].

Построение номограмм для выбора оптимального режима, который обеспечивает нормативный уровень шероховатости при ленточном шлифовании рассматривается в работе Хватова Б.Н. [111]. В работах [16, 55, 100] исследована стойкость абразивных лент, шероховатость поверхности, толщины среза при шлифовании. Основы процесса шлифования рассмотрены в трудах Зубарева Ю.М., Кальченко И.В., Юнусова Ф.С., Орбинского В.М., Панькова Л.А., Вerezуба В.Н., Силина С.С. и др. [41, 42, 63, 64, 96, 101, 138].

Влияние остаточных деформаций детали на точность формообразования поверхности рассмотрены авторами работ [47, 50, 102]. Надо отметить, что такие остаточные деформации могут возникать внутри бандажа при окончании процесса его сборки из двух сегментов или ремонте сквозных трещин (см. п. 1.1). Наиболее распространенным в таких случаях методом восстановления формы бандажа является обработка на специальных стендах [73, 79, 132].



Полезные результаты исследований и опыт их практической апробации в области мобильных технологий ремонта крупногабаритных деталей промышленного оборудования связан с работами Бондаренко В.Н., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., и др. [12, 13, 81, 106, 119, 133].

Для исследования процесса формообразования особый интерес представляют результаты измерений формы поверхностей при обработке крупногабаритных деталей с бесцентровой схемой базирования, рассмотренные в ряде работ Хуртасенко А.В., Чепчурова М.С., Масловой И.В. [53, 112, 113].

Существенное значение для научной организации мобильных технологий обработки опор вращающихся печей имеют исследования напряженно-деформированного состояния материала внутри пятна контакта изложенные в работах Беляева Н. М., Галина Л. А., Саверина М. М., Орлова А. В., Пинегина С. В., Кудрявцева И. В. и других ученых.

В машиностроении по этой теме накоплен обширный справочный материал. Например, при проектировании цементных вращающихся печей допускаемые контактные напряжения принимают в диапазоне  $[\sigma_H]=830-1030$  МПа (как цилиндров, перекатываемых без смазочного материала) [7, 51], а при номинальных условиях эксплуатации рекомендуют [18] поддерживать их в диапазоне 400...430 МПа путем контроля площади пятна контакта (сохранение не менее 90% от нормируемой).

При упрочнении деталей поверхностным пластическим деформированием [39, 48, 89] шероховатость поверхности наиболее интенсивно уменьшается при давлении около 1000 МПа [58], а при оптимальных режимах обкатки обеспечивают напряжения более 1200 МПа. Они зависят [39] от отношения  $K_y$  предела прочности материала обрабатываемой поверхности к пределу текучести. Пластические деформации увеличивают предел текучести материала на поверхности пятна контакта. При  $K_y \geq 1$  возникает перенаклеп (начинается шелушение и отслаивание поверхностного наклепанного слоя). Установлено [62], что чем больше деформируемость, тем выше выносливость (даже при одинаковой твердости различных материалов). При этом в результате первого нагружения



величина остаточной деформации составляет 50-85% от того ее уровня, которого она достигает при  $10^6$  числа циклов нагружения.

Необходимо отметить активное применение в настоящее время для решения нелинейных задач контактного взаимодействия численных методов, основанных на конечно-элементном анализе, реализованном в компьютерных *CAD-CAE-CAM* системах таких, как *SolidWorks (Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp.)*, *NX (Siemens PLM Software Inc.)*, *APM WinMachine (НТЦ АПМ)* [5, 144].

Возможности системы *SolidWorks* со встроенным пакетом конечно-элементного анализа *SolidWorks Simulation* для оценки упругих деформаций при нагружении бандажа в процессе обработки использованы в работах [57, 119]. Примеров компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния контакта бандажа и опорного ролика вращающейся печи в процессе восстановительной обработки в открытых источниках информации обнаружить не удалось.

Влияние податливости опорных узлов вращающейся печи цементной печи 5x185 м на положение опорного ролика рассмотрено в работе [128]. С помощью пакета *APM WinMachine* найдены максимальные погрешности расположения ролика при номинальной нагрузке и податливых опорах (смещение в плоскости фундаментной рамы до 6 мм и поворот ролика в сечении силовой плоскостью на угол до 0,06 град).

Таким образом, из анализа перечисленных выше работ следует, что процесс формообразования при обработке с переменным распределением припуска по обрабатываемой поверхности бандажа изучен не достаточно. Остается неясным также влияние этого процесса на изменения напряженно-деформированного состояния материала на пятне контакта между бандажом и роликом, выбор режимов обработки и функционирование вращающейся печи.

### **1.5. Обоснование цели и задач исследования**

Результаты выполненного в предыдущих параграфах анализа позволяют сделать следующие выводы:

1) совершенствованием конструкций опорных узлов вращающихся печей добиться ликвидации причин, вызывающих необходимость применения мобильной технологии ремонта бандажа и опорных роликов, не удастся;

2) профилактическая обработка необходима для обеспечения нормативного качества поверхности катания бандажа и ролика в межремонтный период, поэтому она связана со снятием одинакового припуска по всей поверхности катания, имеет преимущественное применение в настоящее время на практике и выполняется шлифованием;

3) восстановительная обработка необходима для устранения погрешности формы бандажа, а это возможно только при неравномерном распределении припуска по обрабатываемой поверхности;

4) научные основы мобильной технологии восстановительной обработки не учитывают взаимовлияние процесса резания и контактного взаимодействия бандажа и ролика, геометрические закономерности между формообразованием и распределением припуска на обрабатываемой поверхности, интегральные особенности переносных станков.

Таким образом, представляет интерес теоретическое и экспериментальное исследование восстановительной обработки бандажей с погрешностями формы с учетом изменения поверхности базирования бандажа, напряженно-деформированного состояния ее материала, девиаций корпуса вращающейся печи.

Цель работы – повышение точности восстановительной обработки переносным технологическим оборудованием профиля бандажа вращающейся печи путем научно обоснованного выбора геометрических параметров, определяющих формообразование базирующей поверхности бандажа при условии сохранения ее контактной прочности

В настоящее время рассматривать формообразование профиля при изготовлении деталей совместно с перманентным изменением напряженно-деформированного состояния обрабатываемой поверхности позволяют в основном компьютерные САМ-системы, такие как *SolidCAM (Dassault Systèmes*

*SOLIDWORKS Corp.*) или *ADEM-VX* (группа компаний *ADEM*). Однако их применение для исследования восстановительной обработки бандажа осложняется особенностями моделирования такой системы СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь), в которой заготовка (бандаж) совершает сложное движение, связанное к тому же с результатом самой обработки.

Поэтому для достижения цели исследования будем разрабатывать две разные, но связанные друг с другом через исходные данные расчетные модели. Одна из них необходима для изучения дискретного изменения в процессе восстановительной обработки напряженно-деформированного состояния материала на пятне контакта бандажа и ролика. Вторая расчетная модель, учитывая контактные проявления, найденные в первой модели, влияние различных видов погрешностей формы бандажей и вариантов базирования, позволит исследовать перманентный процесс формообразования профиля бандажа при заданном числе рабочих ходов для выбора режимов обработки, необходимых для обеспечения минимального отклонения от круглости профиля бандажа.

С учетом этого для достижения цели исследования требуется решение следующих задач:

- 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.

### **1.6. Выводы**

1. Современные тенденции совершенствования технологии монтажа и ремонта, способствующие улучшению эксплуатационного состояния вращающихся печей и удлинению их межремонтного цикла связаны с организацией регулярной инспекции состояния опорных узлов, профилактической обработкой бандажей и опорных роликов переносными станками и сочетанием возможностей мобильной технологии восстановительной обработки и методов исправления положения геометрической оси вращения печи во время ее эксплуатации.

2. При моделировании восстановительной обработки необходимо учесть влияние на формообразование профиля бандажа конструктивных особенностей станков, связанных с размещением направляющей продольного привода и расположением инструмента по отношению к поверхностям базирования.

4. Теоретические основы мобильной технологии не учитывают взаимовлияние процесса резания и контактного взаимодействия бандажа и ролика, геометрические закономерности между формообразованием и распределением припуска на обрабатываемой поверхности, интегральные особенности переносных станков и девиации корпуса вращающейся печи.

5. Обоснована необходимость построения двух разных моделей, одна из которых дискретно отражает изменение напряженно-деформированного состояния контактного взаимодействия в процессе резания, а вторая, с учетом этого, демонстрирует перманентный процесс формообразования профиля бандажа при неравномерном распределении припуска по обрабатываемой поверхности.

## **2. Идентификация режимов и параметров восстановительной обработки бандажей**

Процесс механической обработки бандажей вращающихся печей является многопараметрическим. Такие зависимости в виду их сложности зачастую не позволяют выяснить причины негативных явлений и демонстрируют лишь их последствия. Поэтому при построении расчетных моделей будем учитывать прежде всего такие параметры опор вращающихся печей, которые при восстановительной обработке оказывают существенное влияние на формообразование профиля бандажа и состояние его поверхности качения.

Большинство параметров, удовлетворяющих этим условиям, заведомо связаны с важными физическими особенностями, объединение которых в одной модели затруднительно. Поэтому для моделирования процесса восстановительной обработки бандажей разработаем две разные, но связанные друг с другом через исходные данные расчетные модели.

В первой из них рассмотрим изменение в процессе обработки контактного взаимодействия между бандажом и роликом, а во второй геометрические особенности формообразования при этом профиля бандажа.

Так как восстановительная обработка, как правило, проводится в условиях, при которых продолжают действовать причины вызвавшие устраняемую погрешность формы бандажей, то при построении расчетных моделей рассмотрим идентификацию параметров с учетом этих условий. К ним относятся как погрешности формы и расположения деталей опор вращающихся печей, так и их упругие деформации при номинальной нагрузке.

### **2.1. Погрешности опорных узлов вращающихся печей**

Допускаемые погрешности вращающихся печей указаны в ОСТ 22-170-87 и СН 208-62 (см. п. 1.1). Из них для рассматриваемых условий представляет интерес информация о допускаемых прогибах корпуса печи, погрешностях расположения подшипниковых узлов оси ролика и формы бандажей. Эти погрешности

необходимо выразить через геометрические связи в расчетных моделях. Поэтому рассмотрим их формализацию в следующих параграфах.

### 2.1.1. Погрешности расположения узлов вращающихся печей

Для обеспечения работоспособности вращающейся печи оси вращения опорных роликов должны располагаться в одной плоскости параллельно друг другу и параллельно оси вращения корпуса печи. Различные отклонения от этого номинального положения ролика являются погрешностями его расположения. Рассмотрим их идентификацию при номинальной форме бандажа и роликов.

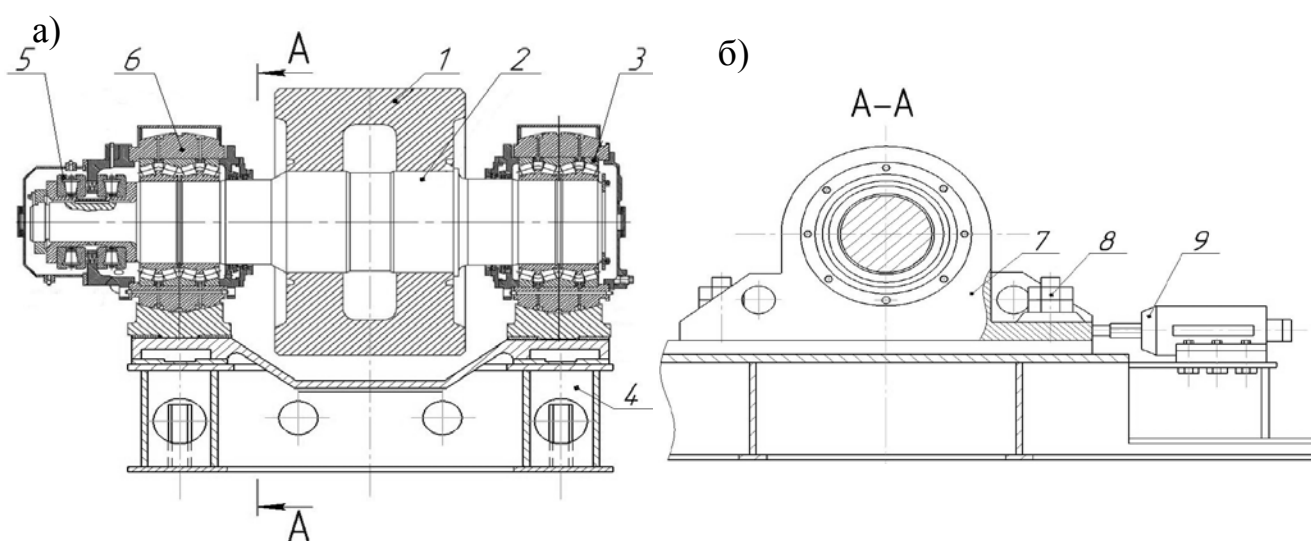


Рис. 2.1. Конструкция роликоопоры: 1 – опорный ролик; 2 – ось; 3 – конические роликоподшипники; 4 – рама; 5 – упорные роликоподшипники; 6 – сферические вставки; 7 – корпус подшипников; 8 – крепежные детали; 9 – упор

В качестве примера используем роликоопору вращающейся цементной печи 5x185 м (рис. 2.1). Она состоит из сварной рамы и двух блоков 4, в каждом из которых установлен опорный ролик 1 с осью 2, опирающейся на два четырехрядных конических роликоподшипника 3. Осевую нагрузку фиксируют упорные роликоподшипники 5. Возможность незначительных поворотов оси вместе с опорами обеспечивается сферическими вставками 6, а регулировки положения корпуса подшипника 7 относительно бандажа упором 9 совместно с крепежными деталями 8.

Погрешности расположения контактной поверхности ролика выразим через смещения подшипниковых опор его оси. Для этого сначала свяжем неподвижную декартовую систему координат (дск)  $ZXY$  (рис. 2.2 и 2.3) с бандажом в т.  $O_3$  –

центре симметрии бандажа и ролика. Как погрешности расположения ролика будем определять перемещения опор  $A$  и  $B$  оси ролика в осевом, поперечном и радиальном направлениях.

Рассмотрим частный случай погрешности расположения опорных поверхностей, при котором возникает поворот ролика вокруг оси  $O_3Z$ . Свяжем с опорой ролика в т.  $O_2$  (рис. 2.2) неподвижную дск  $Z^*X^*Y^*$ . Тогда перемещение т.  $A$  в плоскости параллельной плоскости  $XO_3Y$  (рис. 2.3):

$$a_y = L \cdot \sin(\gamma),$$

в осевом направлении (вдоль оси  $O_2X^*$  или параллельной ей оси  $O_3X$ ):

$$a_{xG} = L - L \cdot \cos(\gamma),$$

в поперечном (вдоль оси  $O_2Y^*$ ) и радиальном (вдоль оси  $O_2Z^*$ ) направлениях соответственно:

$$a_{yG} = L \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\alpha), \text{ и } a_{zG} = L \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\alpha).$$

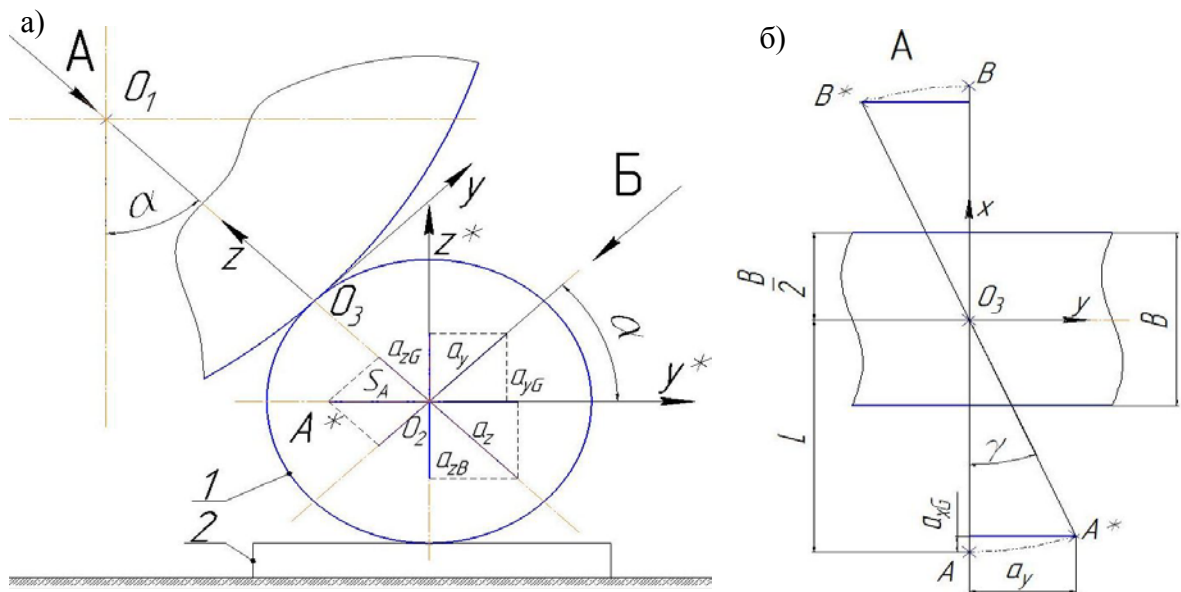


Рис. 2.2. Схема погрешностей положения опорного ролика: а) А – поворот вокруг оси  $O_3Z$ ; Б – поворот вокруг оси  $O_3Y$ ; б) схема погрешностей при повороте ролика вокруг оси  $O_3Z$  на угол  $\gamma$

Например, для  $L=1300$  мм при повороте на три градуса ( $\gamma=3^\circ$ ) вокруг оси  $O_3Z$  получим смещение (погрешность положения) опоры в поперечном направлении  $a_{yG} = 59,0$  мм, в радиальном  $a_{zG} = 34$  мм и осевом  $a_{xG} = 1,8$  мм. За исключением погрешности  $a_{xG}$  остальные смещения существенно превосходят допускаемые. Такие значения достоверно идентифицируются современными измерительными

приборами, и поэтому можно считать, что они будут отсутствовать после монтажа и регулировки опоры. Кроме того, эти перемещения, в общем случае, не могут быть связаны с упругими деформациями конструкции, поскольку направлены перпендикулярно силовой плоскости. Возможной причиной такой погрешности расположения ролика может являться существенный неравномерный износ оси и подшипников опоры связанный, например, с влиянием погрешностей расположения соседних роликоопор.

Такие же результаты получаются и при угле поворота  $\gamma=1^\circ$  ( $a_{yG}=19,6$  мм,  $a_{zG}=11,3$  мм и осевом  $a_{xG}=0,2$  мм). Поэтому в большинстве примеров практического использования следует считать возможными погрешности с углом поворота  $\gamma$  не более  $1^\circ$ .

Рассмотрим второй частный случай погрешности расположения опорных поверхностей, когда оси бандажа и ролика лежат в одной плоскости, но не параллельны друг другу. Для этого свяжем неподвижную дск  $ZXY$  (рис. 2.3) с

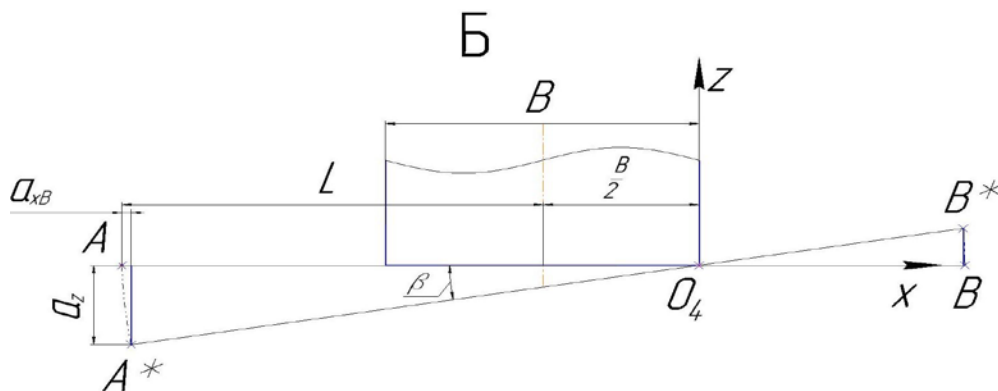


Рис. 2.3. Схема погрешностей при повороте ролика вокруг оси  $O_4Y$  бандажом 1 в т.  $O_4$ . Перемещения т.  $A$  опоры в плоскости  $ZO_4X$  при повороте образующей ролика  $AB$  на угол  $\beta$  вокруг оси  $O_4Y$  в осевом (вдоль оси  $O_2X^*$ ), поперечном (вдоль оси  $O_2Y^*$ ) и радиальном (вдоль оси  $O_2Z^*$ ) направлениях соответственно:

$$a_{xB} = (L+B/2) \cdot (1 - \cos(\beta)),$$

$$a_{yB} = (L+B/2) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha),$$

$$a_{zB} = (L+B/2) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha).$$



Например, для  $L=1300$  мм при повороте на один градус ( $\beta=1^\circ$ ) вокруг оси  $O_4Y$  получим смещение (погрешность положения) опоры в поперечном направлении  $a_{yB}=15,7$  мм, в радиальном  $a_{zB}=27,2$  мм и осевом  $a_{xB}=0,3$  мм.

Эти перемещения точек  $A$  и  $B$  происходят в силовой плоскости и поэтому могут быть результатом не столько погрешностей монтажа или регулировки, сколько проявлением упругих свойств конструкции. В этом случае поворот будет на гораздо меньший угол  $\beta$ . Например, при  $\beta=0,06$  град перемещение т.  $A$   $a_z=2,5$  мм и тогда  $a_{yB}=0,063$  мм,  $a_{zB}=0,11$  мм,  $a_{xB}=0,0$  мм.

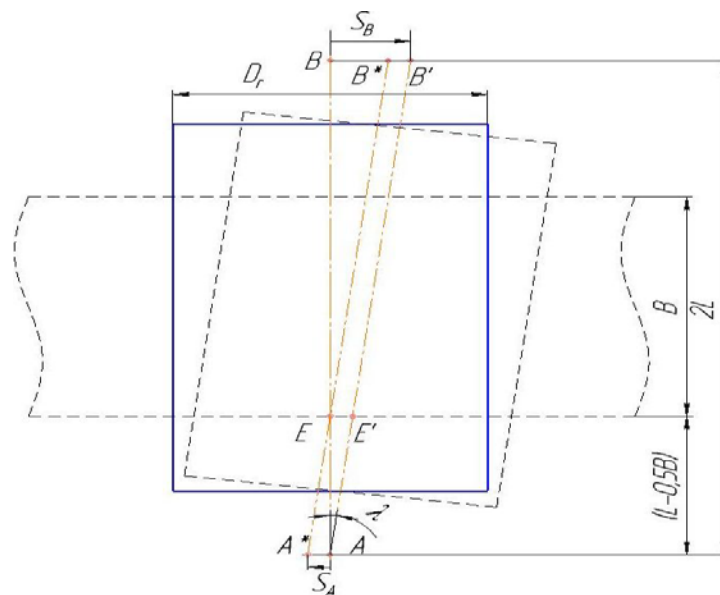


Рис. 2.4. Схема определения погрешности положения ролика при перемещении опоры  $B$  вдоль оси  $O_2Y^*$

В практических условиях рассмотренные выше погрешности, связанные с поворотами или на угол  $\gamma$  или на угол  $\beta$  возникают одновременно. В конструкции опоры (рис. 2.1) для их устранения предусмотрена возможность поступательного перемещения опоры вдоль оси  $O_2Y^*$  и поворота ее за счет этого вокруг оси  $O_2Z^*$ .

Найдем параметры, определяющие положение ролика относительно неподвижного бандажа при перемещении  $BB'=s_B$  подшипниковой опоры  $B$  вдоль оси  $O_2Y^*$  (рис. 2.4). Тогда угол  $\lambda$  поворота оси ролика:

$$\lambda = \arctg\left(\frac{s_B}{AB}\right) \quad (2.1)$$

Большая  $a$  и малая  $b$  полуоси эллипса в сечении ролика проекцией на плоскость  $X^*O_2Y^*$  торцевой плоскости бандажа:

$$a = \frac{D_r}{2 \cdot \cos(\lambda)}, b = \frac{D_r}{2} \quad (2.2)$$

Радиус эллипса в этом сечении:

$$\rho = \frac{a \cdot b}{\sqrt{a^2 \cdot \sin^2(\varphi) + b^2 \cdot \cos^2(\varphi)}} \quad (2.3)$$

Здесь  $\varphi$  – полярный угол профиля сечения.

При перемещении  $s_B$  только одной подшипниковой опоры если бандаж теоретически сохраняет прежнее положение, то контакт между ним и роликом отсутствует. Поэтому для компенсации зазора необходимо поступательно переместить ролик в направлении обратном перемещению точки  $B$  до касания рабочих поверхностей бандажа и ролика. Используя уравнения (2.1), (2.2) и (2.3), рассматривая коллинеарные положения оси опорного ролика (рис. 2.4), определяем численным методом такое положение  $s_A$  при котором одно из значений функции (2.3) равняется координате одной из точек на ребре бандажа. Тогда углы  $\gamma$  и  $\beta$  (см. рис. 2.2):

$$\gamma = \arctg\left(\frac{s_A \cdot \cos(\alpha)}{L - 0,5 \cdot B}\right), \quad (2.4)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{s_A \cdot \sin(\alpha)}{L - 0,5 \cdot B}\right). \quad (2.5)$$

Например, при  $s_B=10$  мм получаем  $s_A=4,9$  мм,  $\gamma=0,194$  град и  $\beta=0,112$  град.

Рассмотренные геометрические модели взаимодействия бандажа и ролика реализованы в программе *Roll\_Reg.m* (приложение 3, П. 3.1), выполненной в системе *MATLAB (MathWorks, Inc.)*.

### 2.1.2. Идентификация погрешности формы бандажей

Закономерность изменения размеров по периметру поперечного сечения бандажа многообразна и заранее неизвестна. Поэтому, выбирая способ описания формы, будем опираться на обоснованные допущения. Например, исключим из рассмотрения локальные неровности в виде раковин, пластические деформации поверхности в форме дорожек или вмятин, различные царапины и следы задира.

Будем также исходить из того, что механическая обработка поверхности при изготовлении и ее истирание при длительной эксплуатации исключают резкие изменения формы в виде уступов, заострений и впадин.

Считая поверхность качения бандажа номинально выпуклой, допускаем небольшую (не более 4 мм при радиусе от 2 до 3 м) обоснованную вогнутость только на переходных участках при центральном угле  $\xi$ , связывающим границы участка, не менее 30 градусов.

Таким образом, считаем поверхность достаточно чистой для того, чтобы ее можно было представить в виде монотонной гладкой замкнутой кривой, связанной с центром окружности минимального радиуса  $R_0$ .

Будем задавать форму поперечного сечения (профиль) бандажа в полярных координатах:

$$\rho = R_0 + S(\varphi), \quad (2.6)$$

где  $\rho$  – радиус-вектор,  $\varphi$  – полярный угол,  $R_0$  – минимальный радиус,  $S(\varphi)$  – аппроксимирующая функция. В общем случае при построении закономерности  $\rho(\varphi)$  за один оборот можно разбить сечение на отдельные участки на каждом из которых задать или аппроксимирующую функцию  $S(\varphi)$ , или постоянный радиус  $R_i$ . Выбирая вид функции  $S(\varphi)$ , выполняем (не только на каждом из интервалов ее возрастания и убывания, но и на границах каждого участка) условие непрерывности ее производной  $S'(\varphi) = dS(\varphi)/d\varphi$ .

Исходные профили бандажей и их изменения в процессе восстановительной обработки будем анализировать на круглограммах в виде кривых:

$$\mu_w(\varphi) = \rho_w(\varphi) - R_{const}, \quad (2.7)$$

где  $\rho_w(\varphi)$  – закономерность изменения полярного радиуса, соответствующая профилю бандажа (в полярной системе координат), получающемуся после каждого рабочего хода с номером  $W$ ,  $\varphi$  – полярный угол,  $R_{const}$  – постоянный радиус (определяет масштаб круглограммы).

Рассмотрим синтез функции (2.6) для бандажей с различными погрешностями формы. Они связаны между собой тем, что перед началом

монтажа всех бандажей на корпус печи их профиль был одинаковым и представлял собой окружность с постоянным радиусом  $R_H = 2425$  мм. Геометрический центр т.  $O$  этой окружности примем за полярный полюс при формализации профилей бандажей.

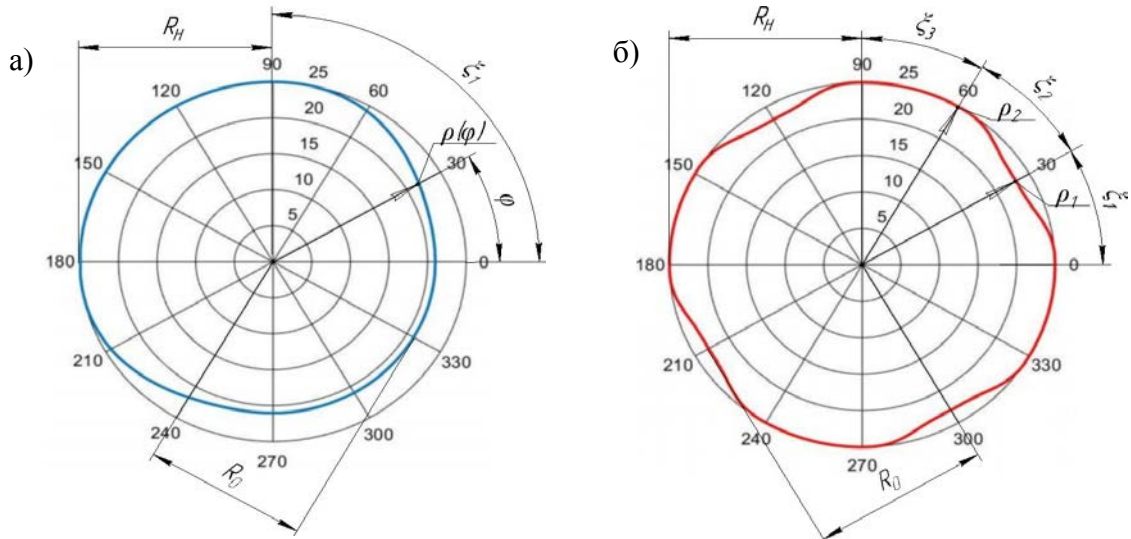


Рис. 2.5. Круглограммы (при  $R_{const} = 2400$  мм) для профилей: а) *Cam*; б) *Camomile*:  $\rho$  – радиус вектор;  $\varphi$  – полярный угол;  $R_H$  и  $R_0$  – соответственно номинальный и минимальный радиусы;  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  – центральные углы участков

Отклонение от круглости поперечного сечения бандажа (рис. 2.5а) с профилем *Cam* вызвано продолжительным износом вследствие, например, неравномерного нагружения. Тогда участок интенсивного износа с постоянным радиусом  $R_0$  будет располагаться симметрично к поверхности номинального радиуса  $R_H$ , а на соседних участках радиус будет соответственно или монотонно уменьшаться, или увеличиваться.

Для этого случая представим профиль в виде кусочно-непрерывной функции из четырех участков. Каждый участок соответствует определенной четверти профиля, т.е. центральные углы (рис. 2.5а), одинаковы:  $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_4 = \pi/2$ . В силу симметрии достаточно идентифицировать переменный радиус только на одном из них, например, когда  $\rho$  увеличивается от  $R_0$  до  $R_H$ . Тогда:

$$\rho = R_0 + \Delta R \cdot 0,5 \cdot (1 - \cos(\pi \cdot \varphi / \xi_1)), \quad (2.8)$$

где  $\Delta R$  – параметр погрешности профиля,  $\Delta R = R_H - R_0$ ,  $\xi_1$  – центральный угол, связывающий границы участка.

На этом участке радиус  $\rho$  изменяется и поэтому не равен радиусу  $R_k$  кривизны поверхности в точке контакта:

$$R_k = \frac{\sqrt{\left(\rho(\varphi)^2 + \left(\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi}\right)^2\right)^3}}{\rho(\varphi)^2 + 2 \cdot \left(\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi}\right)^2 - \rho(\varphi) \cdot \frac{d^2\rho(\varphi)}{d\varphi^2}}, \quad (2.9)$$

где  $\rho(\varphi)$  определяется уравнением (2.8), а его производные выразим в явном виде:

$$\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi} = \frac{\pi \cdot \Delta \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \varphi}{\xi_1}\right)}{2 \cdot \xi_1},$$

$$\frac{d^2\rho(\varphi)}{d\varphi^2} = \frac{\pi^2 \cdot \Delta \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot \varphi}{\xi_1}\right)}{2 \cdot \xi_1^2}.$$

Угол, определяющий направление нормали (радиуса кривизны) в точке контакта:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{R_k}{d\rho(\varphi)/d\varphi}\right). \quad (2.10)$$

Порядок построения профиля *Cam* можно использовать для формирования различных профилей путем варьирования углами  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$  и, выполняя при этом условие:  $\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 = 2 \cdot \pi$ .

Например, для идентификации поперечного сечения бандажа с единичным выступом  $\Delta$  (назовем этот профиль *Cone*) следует рассмотреть четыре участка и задать углы  $\xi_1 = \xi_3, \xi_2$  и  $\xi_4 = 2 \cdot \pi - 2 \cdot \xi_1 - \xi_2$ . На первом и третьем участке профиль выступа ограничен симметричными кривыми (2.8), а на втором и четвертом – дугами с постоянными радиусами соответственно  $R_H$  и  $R_0$  (рис. 2.6а).

Если износ поверхности качения бандажа связан с периодическим неравномерным нагружением, тогда профиль будет содержать повторяемые в каждой четверти и симметрично расположенные участки интенсивного износа. Присвоим этому профилю имя *Camomile*.

Для него представим поверхность в виде кусочно-непрерывной функции из двенадцати участков. В силу симметрии достаточно идентифицировать поверхность только на трех из них. Границы этих участков для первой четверти обозначим центральными углами  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  и  $\xi_3$  (рис. 2.5б). На первом участке (от  $\varphi=0$  до  $\varphi=\xi_1$ ) радиус  $\rho$  уменьшается от  $R_H$  до  $R_0$  по закону:

$$\rho_1 = R_0 + \Delta \cdot 0,5 \cdot (1 - \cos(\pi \cdot (\xi_3 - \varphi) / \xi_3)) \quad (2.11)$$

На следующем участке (от  $\varphi=\xi_1$  до  $\varphi=(\xi_1+\xi_2)$ ) радиус  $\rho_2$  увеличивается от  $R_0$  до  $R_H$  и профиль определяется уравнением (2.8). На заключительном участке (от  $\varphi=(\xi_1+\xi_2)$  до  $\varphi=(\xi_1+\xi_2+\xi_3)$ ) номинальный радиус  $R_H$  не изменяется, поэтому  $\rho_3=R_H$ .

Выполняя такие рекурсивные вычисления для оставшихся трех четвертей,

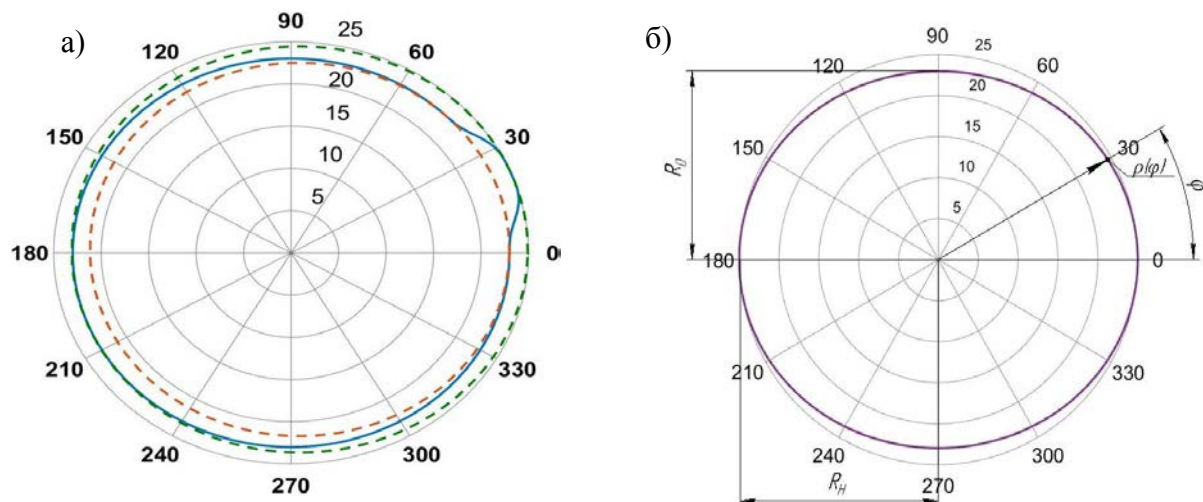


Рис. 2.6. Круглограммы профилей: а) *Cone* (при  $R_{\text{const}}=2400$  мм). Штрихами обозначены окружности, полученные при расчете минимального отклонения от круглости *EFK*; б) *Cassini* (при  $R_{\text{const}}=2400$  мм):  $\rho$  – радиус-вектор;  $\varphi$  – полярный угол;  $R_H$  и  $R_0$  – соответственно номинальный и минимальный радиусы

получим функцию  $\rho(\varphi)$  в замкнутом виде.

Во многих случаях отклонение формы бандажей определяют овальностью (рис. 2.6б). Назовем этот профиль *Cassini*. Описать такую кривую с необходимой точностью можно разными способами.

Больше возможностей для анализа погрешности представляет формализация овальности кривой четвертого порядка в виде одного из овалов Кассини:

$$\rho = \sqrt{c^2 \cdot \cos(2\varphi) + h^{0,5}} \quad (2.12)$$

Здесь  $c > 0$ ,  $a > c \cdot (2)^{0,5}$ ,  $h = c^4 \cdot (\cos(2\varphi))^2 + a^2 - c^4$ ,  $a = \sqrt{R_H^2 - c^2}$ ,  $R_0 = \sqrt{a^2 - c^2}$ .

Поскольку погрешность формы профиля зависит от  $\Delta R = R_H - R_0$ , то при расчетах удобнее сначала найти  $R_0 = R_H - \Delta R$ , а затем коэффициент  $c$  уравнения (2.12):

$$c = \sqrt{\frac{R_H^2 - R_0^2}{2}}.$$

Например, при  $R_H = 2425$  мм и  $\Delta R = 2$  мм получаем  $R_0 = 2423$  мм,  $c = 69,628$  мм и  $a = 2424$  мм. Тогда  $c \cdot (2)^{0,5} = 69,628 \cdot (2)^{0,5} = 98,5$  мм и условие  $a = 2424 > 98,5$  выполняется.

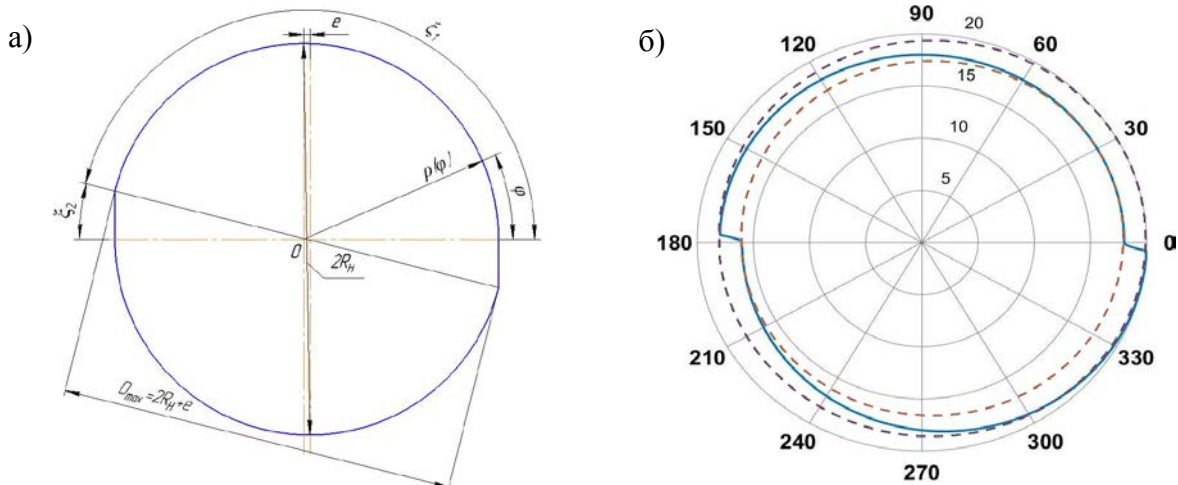


Рис. 2.7. Параметры профиля *Corner*: а) эскиз профиля:  $\rho$  – радиус вектор;  $\varphi$  – полярный угол;  $R_H$  – номинальный радиус;  $D_{max}$  – максимальный диаметр;  $e$  – эксцентриситет;  $\xi_1$  и  $\xi_2$  – центральные углы участков. б) круглограмма профиля (при  $R_{const} = 2407$  мм) сплошная линия, а штриховые – полученные при определении *EFK* концентрические окружности

Для определения по уравнению (2.9) радиуса кривизны  $R_k$  дифференцируем дважды выражение (2.12):

$$\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi} = \frac{A}{2\rho} \quad (2.13)$$

Здесь:

$$A = -c^4 \cdot \frac{\sin(4\varphi)}{h^{0,5}} - 2c^2 \cdot \sin(2\varphi),$$

$$\frac{d^2\rho(\varphi)}{d\varphi^2} = \frac{B}{2\rho} - \frac{A}{4 \cdot \sqrt{(c^2 \cdot \cos(2\varphi) + h^{0,5})^3}}, \quad (2.14)$$

$$\text{где } B = \frac{4 \cdot c^4 \cdot \sin^2(2\varphi) - 4 \cdot c^4 \cdot \cos^2(2\varphi)}{h^{0,5}} - c^8 \cdot \frac{\sin^2(4\varphi)}{\sqrt{h^3}} - 4 \cdot c^2 \cdot \cos(2\varphi).$$

Одну из возможных погрешностей, связанных с монтажом бандажа демонстрирует профиль *Corner* (рис. 2.7). Он состоит из двух одинаковых сегментов окружности ( $R_H = 2425$  мм) с центрами, смещенными друг от друга в радиальном направлении на 2 мм. Выступы с каждой стороны на величину смещения сегментов отсутствуют, т.к. сегменты в этих местах обработаны до параллельных лысок. Полярный полюс совпадает с геометрическим центром одного из сегментов.

В этом случае достаточно идентифицировать форму на четырех участках. Сначала определяем центральные углы  $\xi_2$  и  $\xi_4$  соответственно на втором и четвертом участках:

$$\xi_2 = \arctg(L_e / (R_H - e)), \quad \xi_4 = \arctg(L_e / R_H),$$

где  $L_e = \sqrt{2 \cdot R_H \cdot e - e^2}$ .

Тогда на первом участке (от  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \xi_1$ ) при  $\xi_1 = \pi - \xi_2$ , полярный радиус:

$$\rho_1 = R_H.$$

На втором участке (от  $\varphi = \xi_1$  до  $\varphi = (\xi_1 + \xi_2)$ ):

$$\rho_2 = (R_H - e) / \cos(\pi - \varphi).$$

На третьем  $\xi_3 = \pi - \xi_4$  (от  $\varphi = (\xi_1 + \xi_2)$  до  $\varphi = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3)$ ):

$$\rho_3 = \frac{R_H \cdot \cos(\xi) - e}{\cos(\varphi - \pi)},$$

где угол  $\xi$  определяем из уравнения:

$$\operatorname{tg}(\xi) = \frac{\sin(\varphi - \pi)}{\cos(\varphi - \pi) - \frac{e}{R_H}}.$$

На четвертом (от  $\varphi = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3)$  до  $\varphi = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4)$ ):

$$\rho_4 = R_H / \cos(2\pi - \varphi).$$

Если же круговые сегменты имеют погрешности формы, то следует использовать уравнения, рассмотренные для первого примера.

Необходимо отметить, что на круглограмме профиля *Corner* (рис. 2.7б) расположение параллельных лысок дает неверное визуальное представление о



реальной форме этого профиля. Такой результат получается при трансформации профиля по уравнению (2.7) для отображения на круглограмме в масштабе  $R_{const}$ .

Использовать функции (2.8)...(2.14) в явном виде можно только для анализа движения бандажей и влияния погрешностей разных видов на напряжения внутри пятна контакта. При обработке полярные координаты профиля сечения неявно изменятся. Кроме того, следует учитывать и возможность использования в качестве исходных данных создаваемой модели результатов, полученных путем непосредственного измерения формы реального бандажа.

Поэтому при построении кинематических моделей системы бандаж-ролики-станок будем задавать профиль поперечного сечения бандажа в численном виде. Для этого, организовав вычисления  $\rho(\varphi)$  за один оборот бандажа в программе *Form.m* (приложение 3, П. 3.2), сохраняем результаты расчета в файле данных с названием, соответствующим его профилю: *FormCam.dat*, *FormCassini.dat*, *FormCamomile.dat* или *FormCorner.dat*. Оформленную таким образом модель формы бандажа можно использовать как для решения частных задач в математических пакетах, так и в специализированных инженерных компьютерных системах, сохраняя при этом одинаковые исходные данные.

При этом важным вопросом является выбор шага расчета. Все расчеты будем выполнять в системе *MATLAB (MathWorks, Inc.)* при прочих преимуществах допускающей большие размерности векторов и матриц. За один оборот бандажа будем вычислять положение 62831 точки на профиле сечения (с угловым шагом  $\Delta\varphi=0,0001$  рад). Тогда на поверхности бандажа, например, при номинальном радиусе 2425 мм, расстояние между точками профиля составит не более 0,243 мм.

Погрешность формы профиля бандажа будем оценивать по отклонению от круглости *EFK* по ГОСТ Р 53442-2009. Для этого разработаем алгоритм и программу вычисления *EFK* для каждого профиля.

В формализованном виде эта задача относится к минимизации функции двух переменных. Требуется найти (в декартовой системе координат (дск)  $YOX$ )

координаты центра таких двух concentрических окружностей, для которых целевая функция:

$$q = (r_{MAX} - r_{MIN}) \rightarrow 0 \quad , \quad (2.15)$$

где  $r_{MAX}$  и  $r_{MIN}$  радиусы соответственно описанной и вписанной в профиль сечения окружностей.

В результате предварительного анализа установлено (рис. 2.8), что для рассматриваемых профилей и размеров сечений локальный минимум всегда расположен в пределах сетки не более чем 10x10 мм и устойчиво определяется с точностью 0,1 мм.

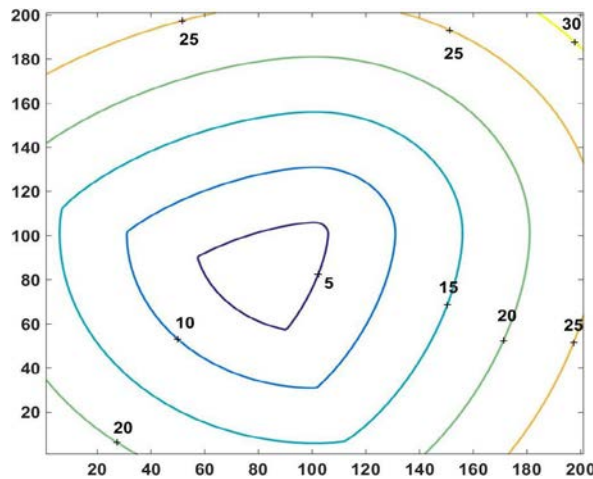


Рис. 2.8. Линии равного уровня целевой функции  $q(x, y)$  отклонения от круглости (в мм) для профиля *Sam* на сетке 20x20 мм симметричной относительно осей декартовой системы координат *YOX*

Поэтому при численном решении, сначала переносим систему координат в каждую точку сетки и пересчитываем в этой системе координаты профиля бандажа. Затем для каждой  $i$ -той точки профиля с координатами  $x_i$  и  $y_i$  вычисляем радиус:

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}.$$

Проверяем условия  $r_{MAX} < r_i < r_{MIN}$  и при выполнении одного из них соответственно присваиваем  $r_{MAX} = r_i$  или  $r_{MIN} = r_i$ . При  $i=62831$  полученные  $r_{MAX}$  и  $r_{MIN}$  являются радиусами соответственно описанной и вписанной в профиль бандажа окружностей с центром в рассматриваемой точке сетки. После вычисления в (2.15) целевой функции  $q_i$  при выполнении условия  $q_{min} > q_i$

сохраняем  $q_{\min} = q_i$  и переходим к аналогичным вычислениям в следующей точке сетки.

Полученное при окончании расчета  $q_{\min}$  является минимальным отклонением от круглости  $EFK = q_{\min}$  для данного профиля бандажа при радиусах концентрических окружностей  $r_{MAXi}$ ,  $r_{MIN}$  с центром в т.  $F$ , координаты  $x_F$  и  $y_F$  которой вычисляются в дск  $XOY$ , связанной с профилем бандажа, таким образом, что ее центр совпадает с полярным полюсом в т.  $O$ , а ось  $OX$  с полярным радиусом  $\rho(\varphi)$  в начальном положении при  $\varphi=0$ .

Таблица 2.1

Параметры профилей бандажей с погрешностями формы

Профиль	Параметр погрешности профиля, мм	Координаты т. F центра концентрических окружностей, мм		Радиусы концентрических окружностей, мм		Отклонение от круглости по ГОСТ Р 53442-2009
		$x_F$	$y_F$	$r_{MIN}$	$r_{MAX}$	
Cam	$\Delta R$					$EFK_0$
	2	-1,8	1,8	2422,34	2423,67	1,33
	20	-9,3	9,3	2411,85	2418,18	6,33
Cone	2	0,9	0,4	2422,08	2424,02	1,94
	20	9,2	3,8	2395,75	2415,06	19,31
Cassini	2	0	0	2423	2425	2
	20	0	0	2405	2425	20
Camomile	2	0	0	2423	2425	2
	20	0	0	2405	2425	20
Corner	2	1	0	2424	2425,99	2

Для рассмотренных исходных профилей бандажей  $EFK$ ,  $r_{MAXi}$ ,  $r_{MIN}$ ,  $x_F$  и  $y_F$  найдены в программе *Form.m* при синтезе этих профилей. Согласно этим результатам (табл. 2.1), чем больше  $\Delta R$ , тем больше  $EFK$  и  $x_F$ , и  $y_F$ . При одинаковых исходных данных ( $\Delta R$  и  $R_H$ ) меньшее  $EFK$  получено для профиля *Cam*, но этот профиль отличается наибольшим смещением т.  $F$  центра концентрических окружностей от т.  $O$ .

## 2.2. Модель контактного взаимодействия бандажа и ролика

Расчетная модель контактного взаимодействия между бандажом и роликом необходима для оценки напряженно-деформированного состояния поверхностей качения бандажа и ролика при их изменении в процессе восстановительной обработки бандажа.

Формировать модель контактного взаимодействия будем на следующих последовательных этапах:

- моделирование контакта бандажа и ролика, возникающего при эксплуатации вращающейся печи;
- определение допускаемых напряжений;
- формализация изменений контактного взаимодействия в процессе обработки бандажа.

### **2.2.1. Построение конечно-элементной модели контактного взаимодействия**

При создании расчетной модели будем исходить из того, что требуется получить количественную оценку, характеризующую предельное напряженно-деформированное состояние материала поверхности качения на пятне контакта между бандажом и опорным роликом. При постоянных размерах взаимодействующих деталей основное влияние на состояние их контакта оказывает величина и направление реакции в каждой точке поверхности пятна контакта.

Поэтому с целью обоснования допущений необходимых для формирования модели, сначала рассмотрим факторы, от которых зависит нагружение пятна контакта:

- 1) длина, диаметр и толщина обечайки вращающейся печи, ее угол наклона к горизонту, размеры и количество бандажей, расстояния между роликоопорами, наличие гидроупоров;
- 2) угловые скорость и ускорение бандажа, расположение и конструкция привода барабана;
- 3) температура внутри и снаружи корпуса барабана и его тепловые деформации;
- 4) конструкция роликоопоры, способ ее закрепления и особенности фундамента;
- 5) погрешности формы бандажей и расположения опорных роликов.

Из анализа первого пункта следует вывод о том, что самую простую и достаточную для получения достоверных результатов модель можно получить только путем рассмотрения контактных взаимодействий на одной опоре. Это возможно в том случае, если из условия кинестатического равновесия вращающейся печи известно нагружение опоры, а корпус печи обладает существенной изгибной и крутильной жесткостью. В противном случае различные упругие деформации обечайки слева и справа от бандажа могут вызывать неравномерность распределения реакций по пятну контакта, которую тогда следует учитывать в модели.

Рассматривая второй пункт, следует определить возможность исключения дополнительных инерционных нагрузок, увеличивающих реакции в опорах, упругие деформации их деталей и интенсивность нагружения поверхности контакта. Такие динамические явления несущественны для вращающихся печей, у которых при постоянном режиме работы и установившемся цикле частота вращения не превышает 1,25 об/мин.

Расположение механического привода между опорами влияет на нагружение корпуса вращающейся печи и, следовательно, на величину и распределение напряжений по пятну контакта соседних с приводом бандажей. Для остальных бандажей эти особенности проявляются в меньшей мере, и поэтому для них будем учитывать только вес материала внутри корпуса.

Температура оказывает влияние на свойства поверхности контакта, а тепловые деформации корпуса изменяют взаимное расположение бандажа и ролика. При установившемся режиме работы моделирование одиночного контакта возможно при условии, что влияние тепловых деформаций вращающейся печи можно учесть в исходных данных, рассматривая тепловое и статическое равновесие опоры как частный случай.

Проанализируем четвертый пункт. В общем случае роlikоопора представляет собой опорный ролик 1, напрессованный на ось 2, которая опирается на подшипники качения или скольжения 3 (рис. 2.1). Обе роlikоопоры корпусами подшипников 7 установлены на раму 4 опоры вращающейся печи.

Кроме ролика 1 все перечисленные детали опоры можно не учитывать только в том случае, если они обладают существенной жесткостью, т.е. их упругие деформации при всех режимах работы не влияют на положение ролика в пространстве. Такие же обязательные требования относятся к раме и фундаменту. При этом является принципиальным и не подлежит упрощению расположение в пространстве оси вращения ролика.

Таким образом, поставленную задачу будем рассматривать при следующих допущениях:

- на корпус вращающейся печи от его привода действует только постоянный крутящий момент;
- функционирование опорного узла происходит при постоянной температуре (тепловые деформации не учитываются);
- бандаж вращается вместе с корпусом вращающейся печи (проскальзывания между ними отсутствуют) с постоянной скоростью;
- опоры роликов под действием реакции от бандажа не изменяют свое положение, которое учитывает как погрешности их расположения, так и упругие деформации конструкции;
- ролики имеют номинальные форму и размеры.

Построение конечно-элементной модели выполним в интегрированном CAE-приложении *NX Advanced Simulation (Siemens PLM Software Inc.)*. В качестве решателя выбираем *Nx Nastran*.

Прежде всего, учитывая указанные допущения, будем рассматривать контакт только двух стальных твердых тел с выпуклыми цилиндрическими поверхностями. Все их отличия от формы реальных деталей в модели при условии статического равновесия (исходя из равномерного вращения корпуса) будем компенсировать реакциями связей.

Бандаж представим в виде цилиндрического сегмента, ограниченного двумя параллельными, вертикальными плоскостями (рис. 2.9). Радиусы наружной и внутренней поверхности, а также ширина сегмента соответствуют размерам реальной конструкции бандажа. Например, при проведении расчетов принимали:

бандаж длиной 1000 мм, внешний диаметр – 6100 мм, внутренний диаметр – 4550 мм.

Расстояние между вертикальными плоскостями, ограничивающими габариты сегмента, будем выбирать исходя из симметрии модели, жесткости бандажа и его нагружения (см. ниже).

Ролик моделируется полым цилиндром с размерами: длиной 1100 мм, внешний диаметр – 1500 мм, внутренний диаметр – 600 мм.

Задаем материал бандажа и ролика: сталь 30ГСЛ по ГОСТ 977-88 ( $\sigma_T=343-392$  МПа,  $HB=180$ ,  $\sigma_B=589-638$  МПа), коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$  и модуль продольной упругости  $E=2 \cdot 10^5$  МПа.

На следующем этапе построения модели выполняем сборку деталей. При этом последовательными действиями обеспечиваем первоначальный линейный контакт деталей, заданное расположение их осей вращения и симметричное расположение бандажа относительно ролика.

Для анализа влияния на пятно контакта погрешностей расположения бандажа и ролика предусматриваем в модели возможность поворота ролика на фиксированные углы  $\gamma$  и  $\beta$  (рис. 2.3 и 2.4).

В качестве ограничения ролика выбираем закрепление – цилиндрический шарнир, т.е. рассматривая материал ролика податливым и способным к перемещению в любых направлениях, фиксируем только перемещение его посадочной на ось опоры поверхности по всем осям координат. Тем самым исключаем из рассмотрения влияние тех упругих деформаций деталей конструкции опоры, которые не связаны с поворотом осей ролика на угол  $\gamma$  или  $\beta$  и определяем эту поверхность как неподвижное основание, на которое должны замыкаться внешние силы и реакции связей, действующие на бандаж.

Для бандажа задаем закрепление по торцевым граням – допускаем только поступательное перемещение в вертикальном направлении, остальные степени свободы исключаем.

Тип объекта симуляции контакта «поверхность-поверхность» между деталями модели выбираем на основании условия силового замыкания высшей

кинематической пары. Кроме того, для получения равномерного распределения напряжений контактной зоны в свойствах этого контакта задаем параметры таким образом, чтобы в диапазоне поиска все зазоры и проникновения были обработаны как соприкосновения.

В качестве исходной области обозначаем внешнюю цилиндрическую грань бандажа, а конечной областью выбираем внешнюю цилиндрическую грань роlikоопор (рис. 2.9).

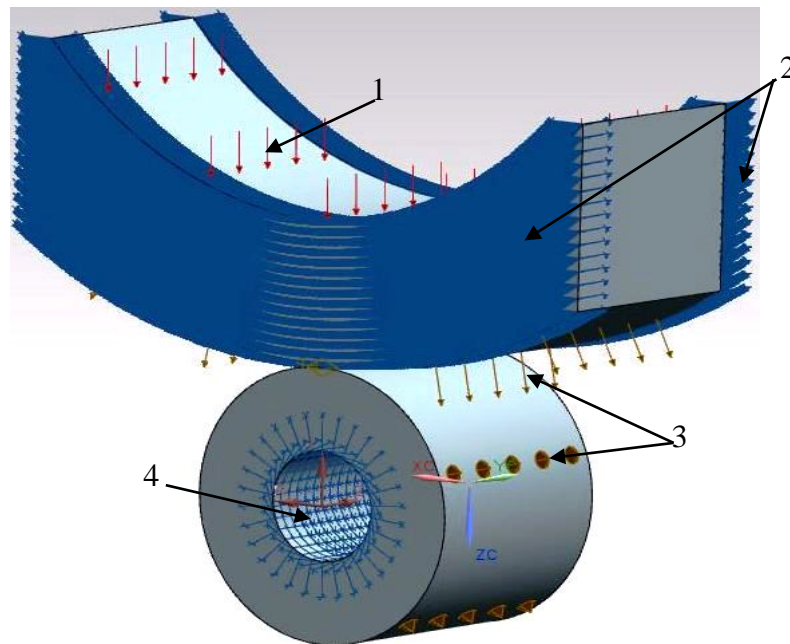


Рис. 2.9. Расчетная модель: 1 – нагрузка, 2 – ограничение бандажа по торцевым граням, 3 – контакт поверхность-поверхность, 4 – ограничение ролика: цилиндрический шарнир

Нагружение модели наиболее существенно влияет на ее достоверность, так как учитывает не только полезную нагрузку, но и реакции связей, возникающие как следствие упрощения строения и формы конструкции опорных узлов вращающейся печи. Поэтому, сначала для корректной идентификации всех действий, связанных с построением модели, рассмотрим расчетные схемы и справочные данные, применяемые при проектировании вращающихся печей.

Реакции в опорах вращающейся печи определяют из расчетной схемы корпуса печи, представляющей собой многопролетную неразрезную статически неопределимую балку [7]. Она находится под действием следующих нагрузок:  $P_k$  от собственной массы корпуса, включая массу зубчатого венца подвенцовой шестерни привода;  $P_f$  от массы футеровки;  $P_m$  от массы обжигаемого материала;



$P_o$  от массы обмазки (наслоения материала на футеровке горячего конца печи);  $P_{ty}$  от массы теплообменных устройств. Кроме того, на корпус действуют крутящий момент и изгибающая нагрузка от открытой зубчатой передачи привода.

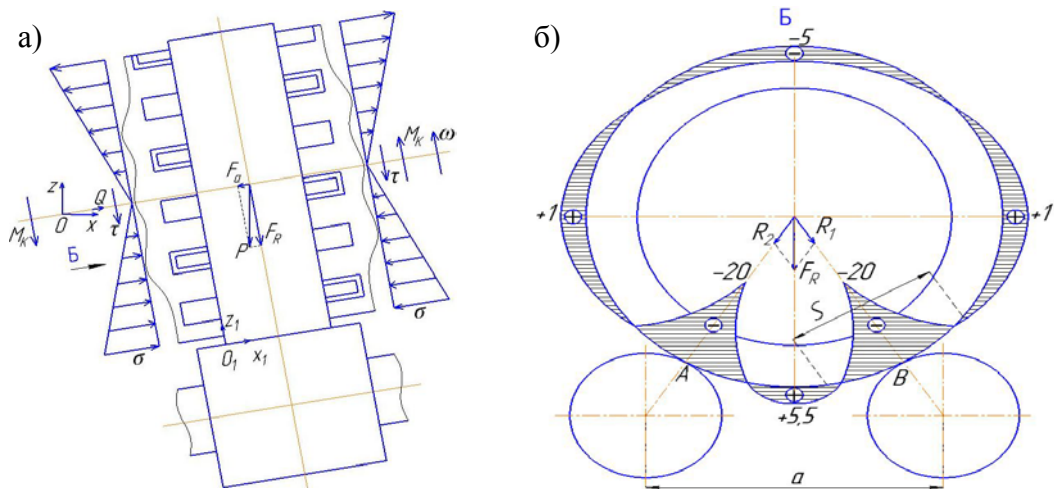


Рис. 2.10. Расчетная схема для определения условий равновесия и нагружения модели: а) равновесие корпуса печи:  $P$  – полная реакция от корпуса печи на опоры,  $F_R$  и  $F_a$  – радиальная и осевая составляющие,  $Q$  – равнодействующая осевых сил,  $\sigma$  и  $\tau$  – реакции в подбандажной обечайке (нормальные и касательные напряжения),  $M_k$  – крутящий момент,  $\omega$  – угловая скорость корпуса печи; б) выбор габарита  $S$  сегмента модели:  $F_R$  – радиальная составляющая полной реакции опоры;  $R_1$  и  $R_2$  – нагрузка на каждый ролик; на эпюре нормальных напряжений, возникающих в поверхностных слоях материала бандаж, при действии на него  $R_1$  и  $R_2$  цифрами обозначено отношение максимальных напряжений в этом сечении к напряжениям в сечении, совпадающим с горизонтальной осью симметрии бандаж

Так как действующие нагрузки направлены вертикально, то в расчетной схеме их раскладывают относительно оси вращения печи на радиальную  $F_R$  и осевую  $F_a$  составляющие (рис. 2.10а). Радиальные составляющие  $F_R$  уравниваются реакциями роликоопор  $R$ , а осевые  $F_a$  силами трения скольжения  $F_T$  бандаж по базирующим поверхностям опорных роликов и (в общем случае) реакцией  $F_y$  от упорного ролика. Обозначим их равнодействующую через  $Q = F_T + F_y$ .

С учетом такого разложения нагрузок корпус вращающейся печи в расчетной схеме располагают горизонтально. Тогда в поперечном сечении (рис. 2.10б) при выполнении условия симметричного расположения опор выполняют разложение полной реакции  $F_R$  роликоопор на реакции  $R_1 = R_2$ , действующие на каждый опорный ролик.

Так же поступим и в конечно-элементной модели. Оси вращения бандаж и опорного ролика располагаем горизонтально, а внешнюю нагрузку от корпуса

вращающейся печи, действующую на внутреннюю поверхность бандажа, распределяем равномерно по внутренней поверхности сегмента, направляем вертикально вниз и принимаем равной  $R_1$ .

Принятое распределение нагрузки  $P$  может отличаться от реального воздействия. Поэтому габариты сегмента (расстояние  $S$  на рис. 2.10б) выбираем насколько это возможно минимальными ( $S=3400$  мм). Тогда, за счет увеличения изгибной жесткости сегмента существенно уменьшается влияние распределения нагрузки  $P$  на размеры пятна контакта и контактные напряжения на нем. При этом напряжения на внутренней поверхности сегмента не влияют на результат и поэтому не рассматриваются.

Осевая реакция  $Q$  в модели учитывается путем наложения связей на торцевые поверхности бандажа, а изгибающие реакции на бандаж (рис. 2.10а) от корпуса вращающейся печи считаем взаимно уравновешенными в силу симметрии конструкции и существенной жесткости подбандажной обечайки.

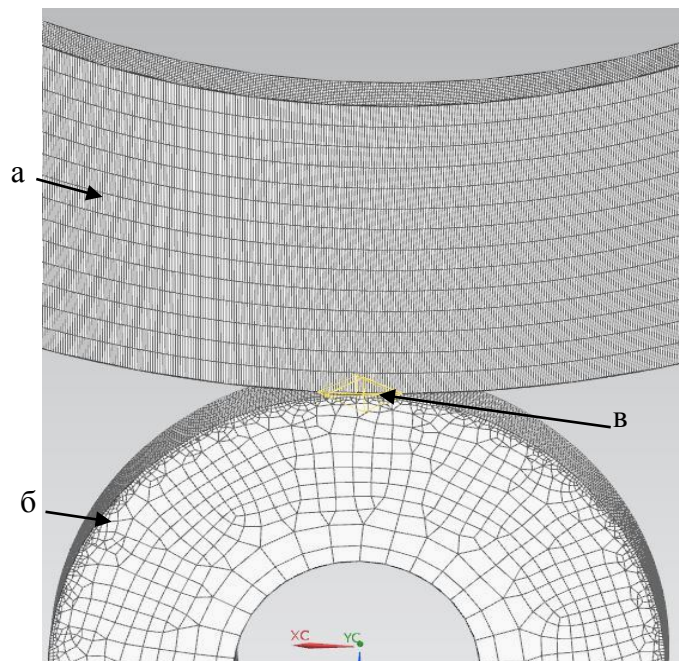


Рис. 2.11. Конечно-элементные сетки в расчетной модели: а – сетка бандажа размер элемента 80 мм; б – сетка ролика размер элемента 80 мм; в – параметр сетки 580 элементов на ребре

Величину нагрузки задаем исходя из значения  $R_1$ , известного из результатов примеров расчетов и нормативных данных [10, 95]. Для выполнения расчетов с указанными выше геометрическими размерами деталей принимаем, что  $R_1=4$  МН.

На следующем этапе задаются важные для конечно-элементного анализа размеры 3D гексаэдральной сетки. Параметры сетки могут быть разными для каждой из деталей и, кроме того, разной в отдельных частях этих деталей. Это дает возможность подробно анализировать напряженно-деформированное состояние только в интересующих точках поверхности. Решатель Nastran позволяет формировать ячейки сетки разного размера внутри и снаружи тела. Для этого задаем для ролика сетку с размером элемента 80 мм, но с гораздо большим (580 элементов) числом элементов на ребре. При этом сходимость процесса разбиения обеспечивается за счет возможности формирования ячеек треугольной формы. Тогда на поверхности ролика получаем сетку с мелкими ячейками размером (соответственно в осевом и окружном направлениях) 35x4 мм (рис. 2.11). Таким же способом задаем сетку для бандажа.

На этом построение конечно-элементной модели заканчивается. Процесс расчета может занимать разное время, которое, как правило, связано с количеством элементов гексаэдральной сетки. После его окончания результаты находятся в специальном «контейнере», который содержит следующие данные: перемещение по узлам, напряжение по элементам, напряжение по элементам и узлам, реакции по узлам, трассировка контакта по узлам, сила контакта по узлам, контактное давление по узлам.

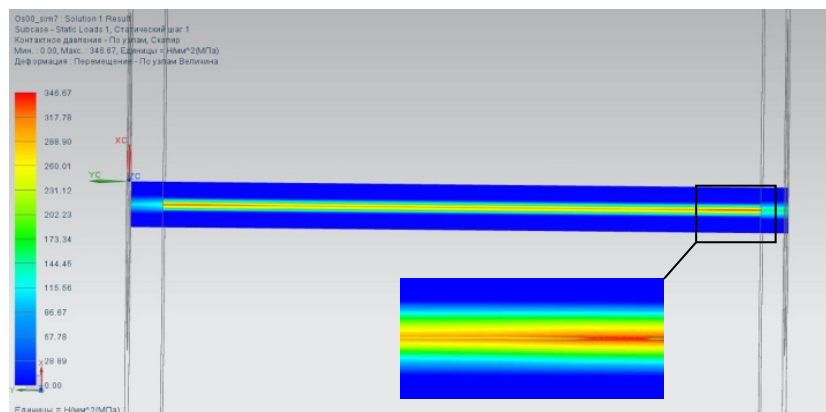


Рис. 2.12. Карта контактных давлений при параллельных осях вращения бандажа и опорного ролика

Для оценки напряженно-деформированного состояния поверхности качения внутри пятна контакта будем использовать карты контактных давлений (рис.

2.12). На них величина напряжений обозначена определенным цветом, палитра которого в качестве масштаба указывается на этом же изображении. Пятно контакта имеет прямоугольную форму. Темная окантовка светлой середины соответствует зоне, узлы которой вошли в результаты, но напряжения в них настолько малы, что сравнимы с цифровым шумом.

Для перечисленных выше исходных данных максимальное давление внутри пятна контакта по результатам расчета равно 346,67 МПа. Проверим этот результат на модели Герца для случая контакта двух стальных цилиндров ( $\mu=0,3$ ). Контактные напряжения:

$$\sigma_H = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot E \cdot (d_1 + d_2)}{d_1 \cdot d_2 \cdot b}}, \quad (2.16)$$

где  $F=4$  МН – нагрузка;  $E=2 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости;  $d_1=1,5$  м;  $d_2=6,1$  м – диаметры соответственно ролика и банджа;  $b=1$  м – длина контакта. Из (2.16) находим:  $\sigma_H = 346,647$  МПа. Сравнивая с результатом расчета на конечно-элементной модели, получаем, что максимальные напряжения получились одинаковыми.

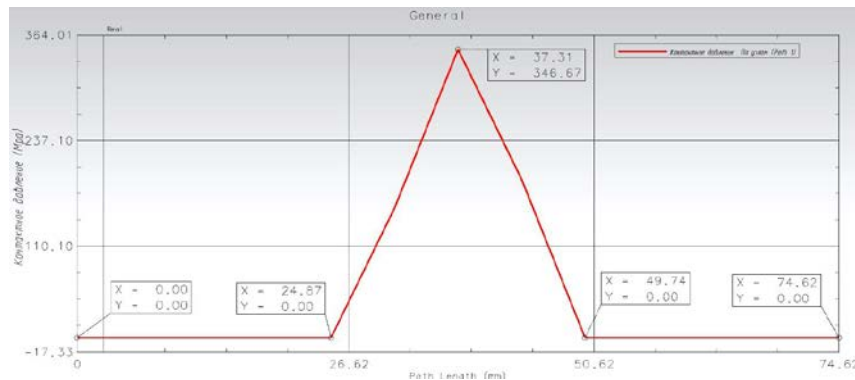


Рис. 2.13. График контактных напряжений в узлах сетки на ребре банджа

Кроме того, достоверность расчетов конечно-элементной модели подтверждается высокой корреляцией закономерности распределения напряжений по пятну контакта с данными аналитических исследований [75]. Численные значения поля напряжений получим, используя вкладку распознавания результатов. При этом напряжения импортируем в *Microsoft Excel* (*Microsoft Corporation*) в виде таблицы для последующей обработки.

Для этого используя навигатор постпроцессора строим функцию распределения напряжений по узлам сетки на ребре бандажа (рис. 2.13). Из нее следует, что ширина площадки контакта

$$B=49,74-24,87=24,87 \text{ мм} \quad (2.17)$$

также совпадает с аналогичными результатами аналитических расчетов.

### **2.2.2. Допускаемые контактные напряжения**

Конечно-элементная модель контактного взаимодействия не предсказывает последствия нагружения материала на пятне контакта. Поэтому необходимо определить условия, при которых возможно повреждение поверхности качения бандажа. Они зависят от многих факторов и в инженерных расчетах оцениваются величиной допускаемых напряжений  $[\sigma_H]$ .

Прежде всего, это факторы, связанные с критериями работоспособности конструкции. Для бандажа и ролика это контактная прочность и износостойкость. Кроме того, в большинстве практических расчетов к ним относят также факторы, которые нельзя идентифицировать в расчетной модели. В основном они связаны с распределением нагрузки по длине контактной линии, состоянием микрогеометрии рабочих поверхностей, влиянием числа циклов нагружений, отношения нормального и касательного усилий при перекачивании и т.п.

Усталостные явления и износ бандажа в процессе механической обработки вследствие относительной кратковременности процесса и последовательного удаления поверхностных слоев материала не учитываем. Таким образом, основным возможным повреждением поверхностей качения в процессе механической обработки бандажа будем считать пластическую деформацию поверхностных слоев материала внутри пятна контакта.

Экспериментальные исследования изменения контактной прочности при механической обработке бандажей и роликов на практике не проводились. Сведения о допускаемых для таких условий контактных напряжениях отсутствуют.

Известные из литературных источников (см. п. 1.4) напряжения, связанные с пластическими деформациями поверхностей качения получены при условии, что они последовательно возникают во всех точках на поверхности контакта. Если это условие в процессе механической обработки бандажа не выполняется, тогда может получиться неоднородная по механическим свойствам поверхность, в которой зоны упрочнения расположены локально. Вследствии этого возможны как искажение формы, так и переменные сопротивления при резании.

Поэтому допускаемые контактные напряжения представим в виде двух ориентировочных ограничений: 1) максимальное предельное напряжение, при котором отсутствуют негативные изменения в материале; 2) минимальное контактное напряжение, при котором появляется повреждение поверхности.

Сначала рассмотрим первое ограничение. Известно [76, 77], что материал вблизи площадки контакта, не имея возможности свободно деформироваться, испытывает объемное напряженное состояние. В наиболее напряженной точке оно близко к равномерному сжатию. Поэтому в зоне контакта материал может выдержать без появления остаточных деформаций весьма большие давления.

Опасная точка расположена на глубине  $h$ , равной 0,4 ширины площадки контакта двух стальных цилиндров. Например, с учетом (2.17) получим

$$h=0,4 \cdot B=0,4 \cdot 24,87=9,948 \text{ мм.} \quad (2.18)$$

Напряжение, при котором впервые появляются остаточные деформации в этой точке, найдем по четвертой теории прочности:

$$\sqrt{0,5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 0,5 \cdot (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + 0,5 \cdot (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_T,$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала бандажа или ролика;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения в опасной точке:

$$\sigma_1 = -0,180 \cdot \sigma_{Hmax1}; \quad \sigma_2 = -0,288 \cdot \sigma_{Hmax1}; \quad \sigma_3 = -0,780 \cdot \sigma_{Hmax1},$$

а  $\sigma_{Hmax1}$  – контактное напряжение.

Тогда появление начальных пластических деформаций в направлении нормали к площадке контакта возможно при контактном напряжении:

$$\sigma_{Hmax1} = \sigma_T / 0,554 = 1,8 \cdot \sigma_T \quad (2.19)$$

Наибольшие касательные напряжения расположены в глубине поверхности качения и равны:

$$\tau_{\max} = 0,31 \cdot \sigma_{H\max 1} \quad (2.20)$$

Предел текучести по касательным напряжениям (по третьей гипотезе прочности):

$$\tau_T = 0,5 \cdot \sigma_T \quad (2.21)$$

Из (2.20) и (2.21) получаем условие отсутствия пластических деформаций в плоскости параллельной площадке контакта в глубине поверхности качения:

$$\sigma_{H\max 1} < 1,6 \cdot \sigma_T \quad (2.22)$$

Поскольку здесь  $\sigma_{H\max 1}$  получаются меньше чем в (2.19), то неравенство (2.22) будем использовать в качестве первого ограничения.

Второе ограничение определим исходя из расчета на сопротивление разрушению [97]:

$$\sigma_{H\max 2} = \sigma_{\text{всж}} / [0,56 \cdot (K)^{1/3}] = 1,78 \cdot \sigma_{\text{всж}} / (K)^{1/3},$$

где  $K = \sigma_{\text{вр}} / \sigma_{\text{всж}}$ ;  $\sigma_{\text{вр}}$  и  $\sigma_{\text{всж}}$  – предел прочности материала соответственно при растяжении и сжатии. При  $K=1$  окончательно получаем:

$$\sigma_{H\max 2} \geq 1,78 \cdot \sigma_{\text{всж}} \quad (2.23)$$

Найдем для стали 30ГСЛ по ГОСТ 977-88, выбранной в конечно-элементной модели в качестве материала бандажа и ролика, рассмотренные ограничения:

$$\sigma_{H\max 1} < 1,6 \cdot \sigma_T = 1,6 \cdot 343 = 549 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{H\max 2} \geq 1,78 \cdot \sigma_{\text{всж}} = 1,78 \cdot 638 = 1136 \text{ МПа}.$$

Теперь, оценивая результаты расчетов конечно-элементной модели, будем относить их к одной из трех групп опасности.

Контактные напряжения, которые можно отнести к первой группе соответствуют условию  $\sigma_H \leq 549$  МПа, т.е. можно считать, что тогда при механической обработке бандажа контактная прочность поверхностей качения не изменяется.

Вторую группу опасности представляют контактные напряжения, относящиеся к диапазону  $549 \text{ МПа} < \sigma_H < 1136 \text{ МПа}$ . В этом случае неизбежны

пластические деформации, особенно на расстоянии  $h$  в (2.18) от поверхностного слоя. С одной стороны, они связаны с поверхностным упрочнением материала, а с другой – в зависимости от характера приложения нагрузки возможно появление перенаклепа.

При  $\sigma_H > 1136$  МПа контактные напряжения отнесем к третьей группе опасности. В этом случае внутри пятна контакта будут возникать повреждения различной интенсивности в виде вмятин, трещин, шелушения, отслаивания или краевых сколов.

### 2.2.3. Идентификация результатов обработки бандажа

Моделирование средствами современных САМ систем непосредственно процесса механической обработки бандажа приставными станками в силу особенностей взаимодействия обрабатываемой поверхности и инструмента затруднительно.

Вместе с тем, для анализа изменения в зависимости от пути резания размеров пятна контакта и картины контактных напряжений на нем достаточно рассмотреть при условии статического равновесия только влияние изменения в результате резания наружной поверхности бандажа.

Обоснуем это утверждение. Рассмотрим влияние силы резания  $P_p$  на контактное взаимодействие бандажа и ролика.

Составляющие силы резания  $P_p$  [98]:

$$P_x = 10 \cdot C_x \cdot t^{X_{px}} \cdot S^{Y_{px}} \cdot v^n \cdot K_p; \quad (2.24)$$

$$P_y = 10 \cdot C_y \cdot t^{X_{py}} \cdot S^{Y_{py}} \cdot v^n \cdot K_p; \quad (2.25)$$

$$P_z = 10 \cdot C_z \cdot t^{X_{pz}} \cdot S^{Y_{pz}} \cdot v^n \cdot K_p \quad (2.26)$$

Выбираем такие значения параметров, чтобы получить максимальные из возможных силы. Скорость резания  $v$  при обработке определяется числом оборотов  $n$  корпуса вращающейся печи и диаметром бандажа  $D$ :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}.$$

При  $n=1,25$  об/мин и  $D=6,1$  м получаем  $v = 24$  м/мин.

Назначаем глубину резания  $t=2$  мм и продольную подачу  $S = 1$  мм/об.



Выбираем (в [98] табл. 22) для наружного продольного точения резцом с рабочей частью из твердого сплава следующие коэффициенты:  $C_x=339$ ,  $C_y=243$  и  $C_z=300$ . Они учитывают влияние на составляющие сил резания различных условий в диапазоне изменения режимов резания  $t$ ,  $S$  и  $V$ , когда  $K_p=1$  (число 10 вводится для перевода табличных значений в справочниках из кГс в Н). Показатели степеней, определяющие влияния режимов резания  $t$  и  $S$  на составляющие сил резания:  $X_{px}=1$ ,  $X_{py}=0,9$ ,  $X_{pz}=1$ ,  $Y_{px}=0,5$ ,  $Y_{py}=0,6$ ,  $Y_{pz}=0,75$ . Для показателей степени скорости резания ввиду ее малости принимаем  $n_z=n_y=n_x=0$ .

Для того, чтобы учесть влияние фактических условий резания определяем (в [98] табл. 9 и 23) обобщенный поправочный силовой коэффициент:

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{rp}, \quad (2.27)$$

где произведение силовых поправочных коэффициентов учитывает влияние на силу резания:  $K_{mp}$  – обрабатываемого материала;  $K_{\varphi p}$  – главного угла в плане;  $K_{\gamma p}$  – переднего угла;  $K_{\lambda p}$  – угла наклона главной режущей кромки;  $K_{rp}$  – радиуса закругления вершины инструмента.

Для стали 30ГСЛ по ГОСТ 977-88 при  $\sigma_B=600$  МПа получаем (в [98] табл. 9):

$$K_{mp}=(600/750)^{0,75}=0,84.$$

Для продольного точения резцом с рабочей частью из твердого сплава (в [98] табл. 23):  $K_{\varphi pz}=1,08$ ;  $K_{\varphi py}=1,3$ ;  $K_{\varphi px}=0,78$  – при главном угле в плане  $30^\circ$ ;  $K_{\gamma pz}=1,25$ ;  $K_{\gamma py}=2$ ;  $K_{\gamma px}=2$  – при переднем угле  $-15^\circ$ ;  $K_{\lambda pz}=1$ ;  $K_{\lambda py}=1,7$ ;  $K_{\lambda px}=0,65$  – при угле наклона главного лезвия  $15^\circ$ .

Подставляя соответствующие из этих значений в (2.27) для каждой составляющей силы резания получаем:

$$K_{px}=0,84 \cdot 0,78 \cdot 2 \cdot 0,65 \cdot 1=0,84; \quad K_{py}=0,84 \cdot 1,1 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 1=2,2; \quad K_{pz}=0,84 \cdot 1,08 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 1=1,13.$$

По формулам (2.24)...(2.26) окончательно:

$$P_x=10 \cdot 339 \cdot 2^1 \cdot 1^{0,5} \cdot 0,024^0 \cdot 0,84=5695 \text{ Н};$$

$$P_y=10 \cdot 243 \cdot 2^{0,9} \cdot 1^{0,6} \cdot 0,024^0 \cdot 2,2=9976 \text{ Н};$$

$$P_z=10 \cdot 300 \cdot 2^1 \cdot 1^{0,75} \cdot 0,024^0 \cdot 1,13=6780 \text{ Н}.$$

Таким образом, каждая из составляющих силы резания меньше 10 кН.

Точка приложения к бандажу силы резания  $P_p$  зависит от конструкции станка и может располагаться в любой зоне. Направление  $P_p$  зависит от схемы закрепления станка. Для оценки влияния резания на напряженно-деформированное состояние материала на пятне контакта рассмотрим предельный случай, при котором резец располагается таким образом, что нагрузка на опорный ролик возрастает на величину силы резания  $P_p = 10$  кН. Тогда при  $R_1 = 4,01$  МН максимальное контактное напряжение (из модели Герца при контакте двух металлических цилиндров):

$$\sigma_{H\max} = \sigma_H \cdot (4,01/4)^{0,5} = \sigma_H \cdot 1,001,$$

где  $\sigma_H$  контактное напряжение при  $R_1 = 4$  МН.

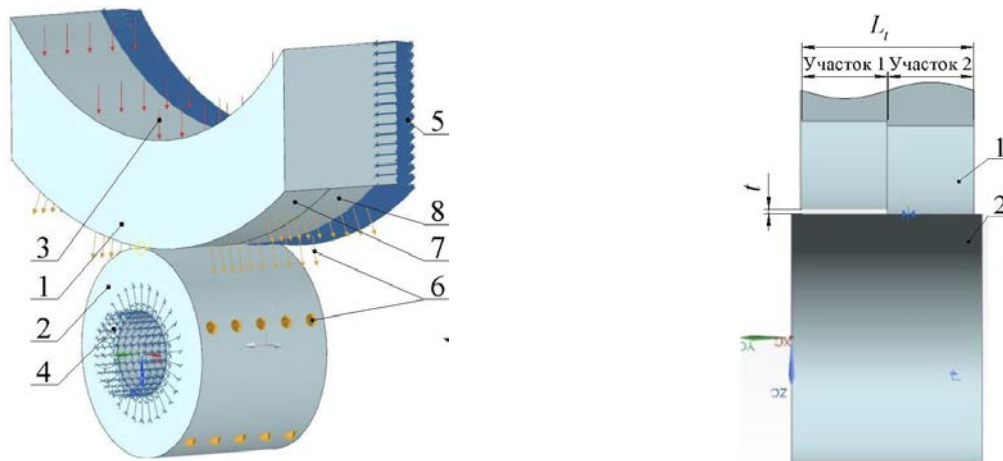


Рис. 2.14. Расчетная модель контактного взаимодействия в процессе обработки бандажа и ролика: 1 – модель бандажа; 2 – модель ролика; 3 – нагрузка; 4 – ограничение ролика: цилиндрический шарнир; 5 – ограничение бандажа по торцевой грани; 6 – контакт поверхность-поверхность; 7 – участок 1 (обработанная поверхность); 8 – поверхность участка 2;  $L_t$  – длина обработки

Изменение контактных напряжений получилось меньше 1%. Поэтому для анализа результатов обработки бандажа можно использовать рассмотренную выше конечно-элементную модель контактного взаимодействия, дополнив ее 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 внесем в модель небольшие изменения. Ролик по-прежнему будем представлять полым неподвижным цилиндром, а на поверхности качения бандажа, моделируемого в виде цилиндрического сегмента, выделим участок прошедший механическую обработку. Обозначим его как участок 1, а оставшуюся необработанную поверхность соответственно участок 2.

Будем считать, что на всем протяжении участка 1, определяемом (слева на право) по направлению продольной подачи, радиус профиля наружной поверхности меньше исходного на величину глубины резания. Это является причиной изменения пятна контакта вплоть до появления зазора.

Для того чтобы учитывать изменение зазора на этом участке под действием на бандаж изгибающей нагрузки, будем варьировать закреплением по его торцевым граням, оставляя неизменным поступательное перемещение в вертикальном направлении (рис. 2.14).

Кроме того, для идентификации зазора в пределах контактной зоны в свойствах контакта «поверхность-поверхность» задаем параметры таким образом, чтобы в диапазоне поиска на участке 2 все зазоры и проникновения были обработаны как соприкосновения. На участке 1 это требование не устанавливаем.

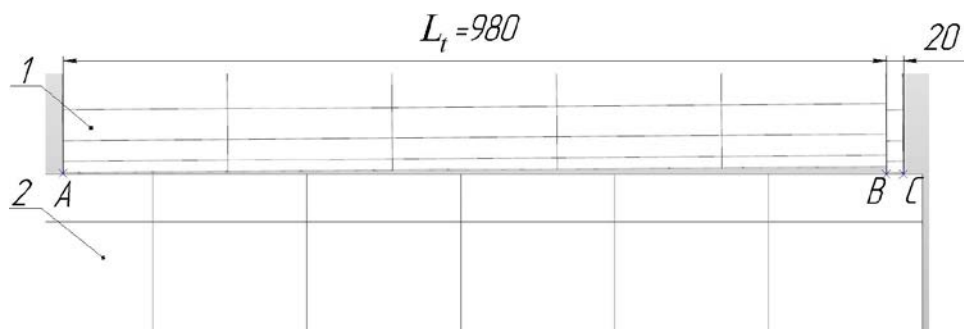


Рис. 2.15. Моделирование контактного взаимодействия при повороте ролика:  
1 – бандаж; 2 – ролик;  $L_t$  – путь резания; A, B и C – точки контакта

Необходимо отметить, что в конце односторонней обработки (когда направление продольной подачи не изменяется на протяжении всего рабочего хода) с уменьшением длины участка 2 при наличии зазора увеличивается тенденция к повороту бандажа в вертикальной плоскости его продольного сечения. Это событие невозможно без деформаций обечайки и повреждений футеровки и означает то, что бандаж не выполняет свою основную функцию

обеспечения жесткости корпуса в опорном узле печи. Поэтому согласно принятым допущениям (п. 2.2.1) возможность такой деформации в модели не рассматривается.

Для моделирования контактного взаимодействия в процессе обработки бандажа при различных погрешностях расположения ролика расчетную модель (рис. 2.14) преобразуем следующим образом: на уровне сборки выполняем поворот ролика на заданный угол, обеспечивая при этом касание бандажа в точках *A* и *B* (рис. 2.15); в конечно-элементной модели выполняем только обновление сетки.

Модель контактного взаимодействия позволяет анализировать только влияние обработки на напряженно-деформированное состояние поверхности качения и базирование бандажа. Для анализа формообразования профиля бандажа необходима другая модель, в которой эти процессы проявляются через геометрические связи системы бандаж-ролики-станок.

### **2.3. Модель восстановительной обработки бандажа**

Расчетная модель восстановительной обработки бандажа вращающейся печи необходима для анализа процесса исправления погрешности формы бандажа с целью выбора рациональных режимов обработки.

Формировать кинематическую модель восстановительной обработки бандажа будем на следующих последовательных этапах:

- моделирование движений бандажа с погрешностью формы на опорных роликах вращающейся печи;
- моделирование движения системы бандаж-ролики-станок (БРС);
- формализация процесса формообразования поперечного сечения бандажа при восстановительной обработке;
- уточнение расчетной кинематической модели на основании результатов анализа восстановительной обработки в конечно-элементной модели.

Содержание последнего из перечисленных этапов будет рассмотрено в разделе 3.3.1.

### 2.3.1. Кинематическая модель системы бандаж-ролики-станок

Разработаем такую кинематическую модель, которая позволяет анализировать в первом приближении движение бандажа на роликах. При этом будем учитывать допущения, принятые для конечно-элементной модели (см. п. 2.2.1), но исключим из рассмотрения влияние на движение бандажа нагрузок и деформаций.

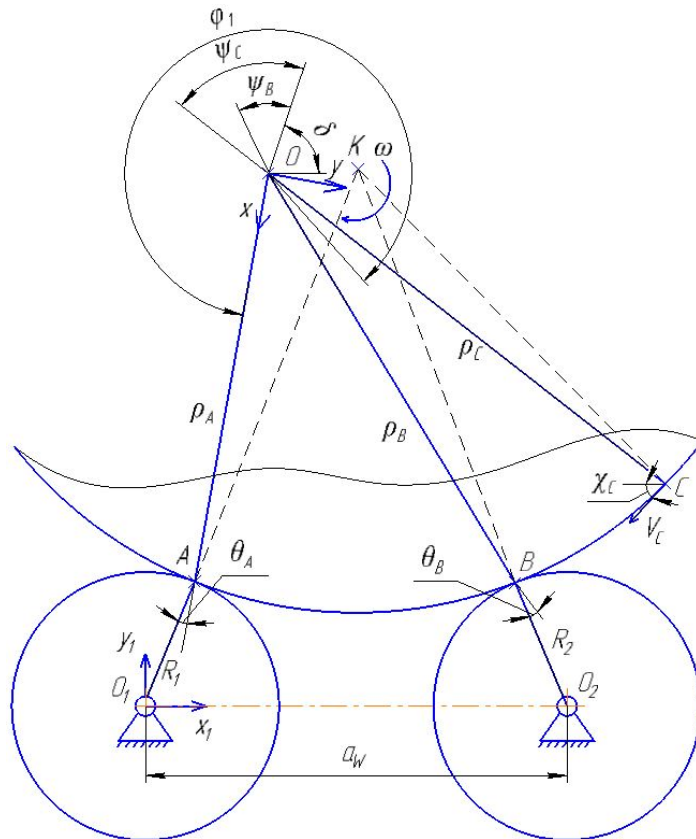


Рис. 2.16. Кинематическая модель бандажа на опорных роликах:

$R_1, R_2$  – радиусы опорных роликов;  $Y_1O_1X_1$  и  $YOX$  – декартовы системы координат связанные соответственно с основанием и с бандажом;  $\delta$  – угол поворота оси  $OX$ ;  $\varphi_1$  – угол поворота бандажа;  $\rho_A, \rho_B, \rho_C$  – радиус-векторы точек на бандаже;  $\psi_B$  – составляющие полярных углов;  $\theta_A, \theta_B$  – углы направления нормалей; т.  $K$  – мгновенный центр скоростей;  $\chi_C$  – углы направления векторов скоростей т.  $C$ ;  $\omega$  – угловая скорость бандажа

Профиль поперечного сечения бандажа представим (см. п. 2.1.2.) в виде гладкой замкнутой кривой:

$$\rho = \rho(\varphi)$$

в полярной системе координат с полюсом (т.  $O$ , рис. 2.16), расположенным в геометрическом центре сечения.

Рассмотрим определение положения бандажа на роликах (рис. 2.16). Сначала для текущей точки на поверхности бандажа намечаем, с учетом кривизны поверхности через  $\theta_A = \theta(\rho_A)$  (см. п. 2.1.2.), ее контакт с роликом 1 в т.  $A$  как  $A = (\rho_A, 0)$ , при этом  $\rho_A = \rho(0)$ . Затем связываем с полярным радиусом  $\rho_A$  ось абсцисс декартовой системы координат (дск)  $YOX$  с центром в т.  $O$ . В этом положении бандажа координаты других точек, например,  $B = (\rho_B, \psi_B)$  и  $C = (\rho_C, \psi_C)$ , где  $\rho_B = \rho(\psi_B)$  и  $\rho_C = \rho(\psi_C)$  радиус-векторы точек, а  $\psi_B$  и  $\psi_C$  – углы, определяющие направления векторов  $\rho_B$  и  $\rho_C$  в дск  $YOX$ . При повороте бандажа по часовой стрелке на угол  $\varphi_1$  полярные радиусы всех точек и направления в них нормалей изменятся:

$$\rho_A = \rho(\varphi_1), \theta_A = \theta(\rho(\varphi_1)), \quad (2.28)$$

$$\rho_B = \rho(\varphi_1 + \psi_B), \theta_B = \theta(\rho(\varphi_1 + \psi_B)), \quad (2.29)$$

$$\rho_C = \rho(\varphi_1 + \psi_C - 2\pi). \quad (2.30)$$

Для того, чтобы найти точку контакта  $B = (\rho_B, \varphi_2)$  (где  $\rho_B = \rho(\varphi_2)$ ,  $\varphi_2 = \varphi_1 + \psi_B$ ) с роликом 2 решаем с учетом (2.6), (2.7), (2.28) и (2.29) численным методом относительно угла  $\psi_B$  уравнение:

$$a_W - C(\psi_B) = 0, \quad (2.31)$$

где  $a_W$  – заданное межосевое расстояние,

$$x_{O2} = \rho_B \cdot \cos(\psi_B) + R_2 \cdot \cos(\psi_B - \gamma_B);$$

$$y_{O2} = \rho_B \cdot \sin(\psi_B) + R_2 \cdot \sin(\psi_B - \gamma_B);$$

$$x_{O1} = \rho_A + R_1 \cdot \cos(\theta_A);$$

$$y_{O1} = R_1 \cdot \sin(\theta_A);$$

$$C(\psi_B) = \sqrt{(x_{O1}^2 - x_{O2}^2) + (y_{O2}^2 - y_{O1}^2)}. \quad (2.32)$$

Анализ этих функций и проверочные расчеты подтвердили, что решение для уравнения (2.31) всегда имеет один корень, который определяется с точностью не менее, чем 0,1 мм.

С учетом этого становится известным текущее положение центра бандажа т.  $O$  в дск  $Y_1O_1X_1$ :

$$x_O = s \cdot \cos(\mu), \quad (2.33)$$

$$y_0 = s \cdot \sin(\mu), \quad (2.34)$$

где

$$s = \sqrt{(x_{O1}^2 + y_{O1}^2)},$$

$$\mu = \delta + \arcsin(y_{O1}/x_{O1}),$$

$$\delta = \arctg\left(\frac{y_{O2} - y_{O1}}{x_{O1} - x_{O2}}\right). \quad (2.35)$$

Теперь координаты в дск  $Y_1O_1X_1$  любых других точек профиля можно определить, используя функции преобразования координат. Например, для т.  $C$ :

$$x_{1C} = b + y_C \cdot \sin(\delta) - x_C \cdot \cos(\delta), \quad y_{1C} = a - y_C \cdot \cos(\delta) - x_C \cdot \sin(\delta),$$

где

$$x_C = \rho_C(\varphi + \psi_C) \cdot [\cos(\psi_C) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\psi_C) \cdot \sin(\varphi)],$$

$$y_C = \rho_C(\varphi + \psi_C) \cdot [-\cos(\psi_C) \cdot \sin(\varphi) + \sin(\psi_C) \cdot \cos(\varphi)].$$

Положение мгновенного центра скоростей т.  $K$  (в дск  $Y_1O_1X_1$ ) с учетом (2.28), (2.29) и (2.35) (см. рис. 2.16):

$$x_{1K} = a_W \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \cos(\alpha_1) / \sin(\alpha_1 + \alpha_2), \quad y_{1K} = a_W \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) / \sin(\alpha_1 + \alpha_2),$$

где  $\alpha_1 = \delta + \theta_A$ ,  $\delta_1 = \psi_B + \theta_B$ ,  $\alpha_2 = \pi - \delta - \delta_1$ .

Абсолютная скорость, например, т.  $C$ :

$$v_C = \omega \cdot \sqrt{(x_{1C} - x_{1K})^2 + (y_{1K} - y_{1C})^2},$$

где  $\omega$  – угловая скорость бандажа. Направление вектора этой скорости:

$$\chi_C = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{y_{1K} - y_{1C}}{x_{1C} - x_{1K}}.$$

Полученные уравнения позволяют организовать вычислительный процесс таким образом, чтобы оценить программным путем в замкнутой форме и обозримом виде кинематические свойства рассмотренной механической системы с учетом ошибок формы бандажа.

Этот алгоритм расчета реализован в программе *Motion.m* [93] (приложение 3, П.3.3), которая в среде *MatLab* (©) после загрузки профиля бандажа в виде файла данных, например, *FormCam.mat* (см. п. 2.1.2), вычисляет траекторию движения геометрического центра профиля т.  $O$ , положение и скорость любой

точки на поверхности качения банджа, а также при расположении индикатора между опорами строит его индикаторную диаграмму, определяет начальное положение инструмента и скорость точки его контакта с банджом.

Таким образом, благодаря тому, что все выходные кинематические параметры модели после расчета становятся известны, существует возможность расширять модель, учитывая особенности конструкций узлов и деталей переносных станков, взаимодействующих с банджом.

### 2.3.2. Варианты расширения модели

Проанализируем влияние размещения инструмента на моделирование движений системы бандаж-ролики-станок (БРС).

Рассмотрим следующие варианты (см. п. 1.3):

1. Переносной станок (УВС-М) располагается между опорами (рис. 1.6). Инструмент 4 (рис. 2.17) на нем закреплен неподвижно относительно дск  $Y_1O_1X_1$ .

2. Переносной станок установлен на фундаменте роликоопоры справа или слева от банджа (рис. 1.8). Инструмент 8 закреплен в динамическом самоустанавливающемся суппорте (ДСС) (рис. 2.17) и вместе с ним может перемещаться относительно дск  $Y_1O_1X_1$ .

3. Весь станок (без ДСС) закреплен на подвижном кронштейне (СПК) (рис. 1.10). Инструмент 7 (рис. 2.17) перемещается вместе с кронштейном 5.

Кинематическая модель, рассмотренная в п. 2.3.1, построена на основании варианта 1. Поэтому при условии, что конструкции станков с ДСС и СПК обеспечивают такое же движение обрабатываемой поверхности относительно инструмента, как и в станке УВС-М, все перечисленные варианты переносных станков можно рассматривать в одной и той же кинематической модели.

В станках СПК это условие выполняется в том случае, если шарнир  $O_3$  кронштейна 8 (рис. 2.17) совпадает с центром вращения т.  $O_2$  опорного ролика 2, а инструмент 7 располагается на середине длины хорды  $BC$ . Полное подобие будет в том случае если  $BC=AB$  и  $O_3O_4=O_1O_2=a_w$ . Тогда результаты расчетов для УВС-





Положение (угол  $\zeta$ ) коромысла  $R_3$  (рис. 2.18) определяется контактом бандажа (с учетом ошибок его формы через  $\theta_N$ ) и копирного ролика  $6$  в т.  $N$ .

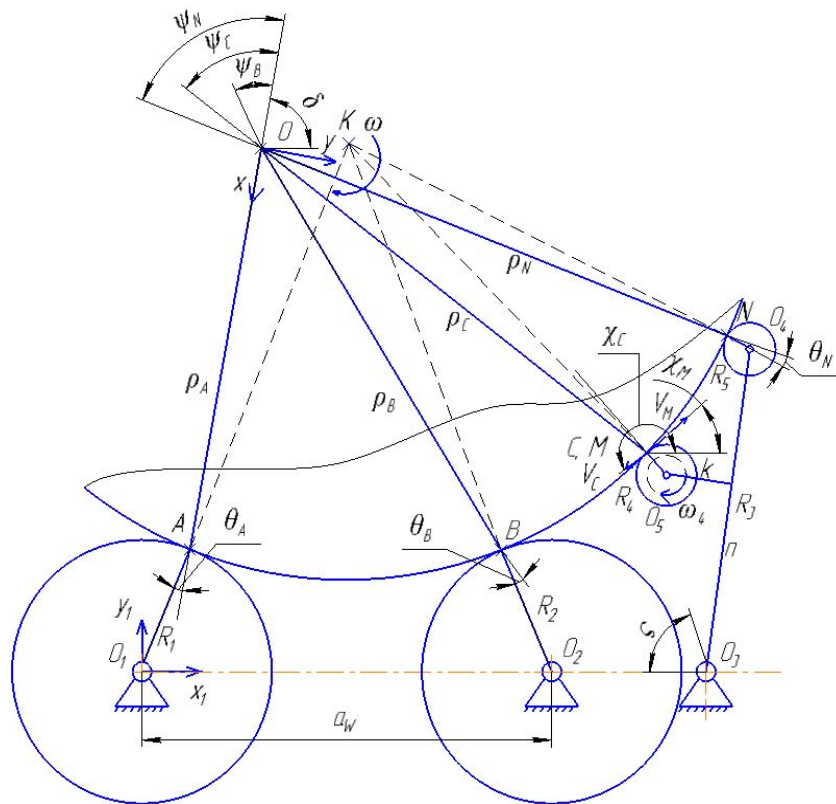


Рис. 2.18 Кинематическая модель системы бандаж-ролики-станок СПК:

$R_1, R_2$  – радиусы опорных роликов;  $R_3$  – длина подпружиненного кронштейна;  $R_4$  – радиус диска;  $R_5$  – радиус копирного ролика;  $\rho_A, \rho_B, \rho_C, \rho_N$  – радиус-векторы точек на бандаже;  $\psi_B, \psi_C, \psi_N$  – полярные углы;  $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_N$  – направляющие углы нормалей;  $\chi_C, \chi_M$  – направляющие углы векторов скоростей;  $\omega$  и  $\omega_4$  – угловые скорости.

Координаты этой точки заранее не известны, т.е. не известен угол  $\psi_N$ .

Поэтому углы  $\zeta$  и  $\psi_N$  вычисляются с учетом (2.11) и (2.35) численным методом из следующей системы уравнений (рис. 2.18):

$$x_{O3} - x_{1N} = R_3 \cdot \cos(\zeta) - R_5 \cdot \cos(\theta_N - \psi_N - \delta),$$

$$y_{1N} = R_3 \cdot \sin(\zeta) - R_5 \cdot \sin(\theta_N - \psi_N - \delta).$$

Контакт бандажа с абразивным инструментом происходит в т.  $C$ . Ее положение в системе координат  $Y_1O_1X_1$  определяется уже найденным положением кронштейна  $R_3$  (углом  $\zeta$ ). Поэтому, из уравнений

$$x_{1C} = b + \rho_C(\varphi_1 + \psi_C) \cdot \sin(\psi_C) \cdot \sin(\delta) - \rho_C(\varphi_1 + \psi_C) \cdot \cos(\psi_C) \cdot \cos(\delta),$$

$$y_{1C} = a - \rho_C(\varphi_1 + \psi_C) \cdot \sin(\psi_C) \cdot \cos(\delta) - \rho_C(\varphi_1 + \psi_C) \cdot \cos(\psi_C) \cdot \sin(\delta),$$

$$x_{O3} - x_{1C} = R_4 \cdot \cos(\zeta - \lambda) + (k^2 + n^2)^{0.5} \cdot \cos(\pi - \psi_C - \delta + \theta_C),$$

$$y_{1C} = R_4 \cdot \sin(\zeta - \lambda) + (k^2 + n^2)^{0.5} \cdot \sin(\pi - \psi_C - \delta + \theta_C),$$

где  $k$  и  $n$  – связанные с кронштейном координаты центра шлифовального круга, находим численным методом  $\psi_C$  и  $\theta_C$ .

Положение мгновенного центра скоростей т.  $K$  определяется из условия, что между бандажом и роликами 1 и 2 скольжение отсутствует. Тогда (см. рис. 2.18):

$$\alpha_1 = \delta + \theta_A, \quad \alpha_2 = \delta + \theta_B,$$

$$x_{1K} = a_W \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \cos(\alpha_1) / \sin(\alpha_1 - \alpha_2),$$

$$y_{1K} = a_W \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) / \sin(\alpha_1 - \alpha_2)$$

и направляющий угол вектора скорости т.  $C$  на бандаже:

$$\chi_C = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{y_{1K} - y_{1C}}{x_{1C} - x_{1K}}.$$

Для той же точки только на инструменте (т.  $M$ ):

$$\chi_M = \psi_C - \delta + \theta_C.$$

Скорости т.  $C$  и т.  $M$  соответственно:

$$v_C = \omega \cdot \sqrt{(x_{1C} - x_{1K})^2 + (y_{1K} - y_{1C})^2}, \quad v_M = \omega_4 \cdot R_4.$$

В системе БРС с ДСС подобие геометрических связей с системой БРС УВС-М будет в том случае, если инструмент 8 располагается на середине длины хорды  $CD$ , а геометрическая связь траверсы 9 с фундаментом 11 (рис. 2.17) печи устроена так, что обеспечивает отсутствие скольжения между бандажом 1 и копирными роликами 6 и 10 (рис. 2.17). Если при этом  $CD = AB$ , то тогда выполняется условие полного подобия и результаты расчетов для УВС-М и ДСС будут одинаковыми. В остальных случаях следует дополнить модель системы БРС геометрическими зависимостями, определяющими в дск  $Y_1O_1X_1$  (рис. 2.17 и 2.18) координаты контакта бандажа с инструментом.

### 2.3.3. Идентификация процесса восстановительной обработки бандажа с погрешностью формы

Рассмотрим процесс обработки резанием поверхности качения бандажа при установке переносного станка между опорами.

Сначала на месте инструмента закрепим стрелочный индикатор для измерения в каждом положении бандажа расстояния от точки контакта  $D$  до оси  $O_1X_1$ . Тогда индикаторная диаграмма  $y_D=f(\varphi_1)$ , построенная за один оборот бандажа, позволит назначить глубину резания и анализировать геометрические особенности взаимодействия материала с элементами модели инструмента в процессе обработки.

Эту функцию строим, решая численно с учетом (2.33), (2.34) и (2.35) относительно  $\psi_D$  уравнение:

$$a_w \cdot 0,5 - x_D(\psi_D) = 0, \quad (2.36)$$

где  $x_D$  – проекция т.  $D$  (принадлежащей бандажу) на ось  $O_1X_1$ :

$$x_D = x_0 - \rho_D \cdot \sin(\zeta).$$

Здесь  $\zeta = \pi/2 - \delta - \psi_D$  и

$$\rho_D = \rho(\varphi_1 + \psi_D) \quad (2.37)$$

Тогда:  $y_D = y_0 - \rho_D \cdot \cos(\zeta) \quad (2.38)$

Анализируя  $y_D=f(\varphi_1)$  полученную за один оборот бандажа, определяем начальное положение инструмента  $y_D$  и назначаем глубину резания  $t$ . Тогда положение инструмента относительно оси  $O_1X_1$  на проходе с номером  $W$ :

$$y_E = y_{D\min} + t, \quad (2.39)$$

где  $y_E$  – координата вершины инструмента,  $y_{D\min}$  – минимум функции (2.38) при предыдущем проходе с номером  $(W-1)$ ,  $y_{D\min} = y_D$  при  $W=1$ .

Рассматривая процесс обработки в первом приближении, считаем, что взаимодействие инструмента с материалом бандажа определяется проекцией  $DE$  (рис. 2.19 и 2.20) режущей кромки на плоскость поперечного сечения. Тогда, например, для радиус-вектора  $\rho_3(\varphi_1 + \psi_D)$  конец которого совпадает с точкой  $D$  радиус обработанной поверхности:

$$\rho_3'(\varphi_1 + \psi_D) = \rho_3(\varphi_1 + \psi_D) - DE.$$

Если точка профиля бандажа на момент проверки контакта с инструментом будет находиться в точке  $H_6$ , то при  $\rho_{46}(\varphi_1 + \psi_{46})$  получаем приращение длины  $H_6E > DE$  отсекаемого от радиуса участка:

$$\rho_{46}'(\varphi_1 + \psi_{46}) = \rho_{46}(\varphi_1 + \psi_{46}) - H_6E.$$

Такая замена достоверна только при адекватном определении положений центра бандажа и точки  $H_6$ . Для точки  $H_6$  это относится и к общему случаю при  $\rho_{56}(\varphi_1 + \psi_{56})$ , и угле  $\zeta_5$ :

$$\rho_{56}'(\varphi_1 + \psi_{56}) = \rho_{56}(\varphi_1 + \psi_{56}) - H_6 M.$$

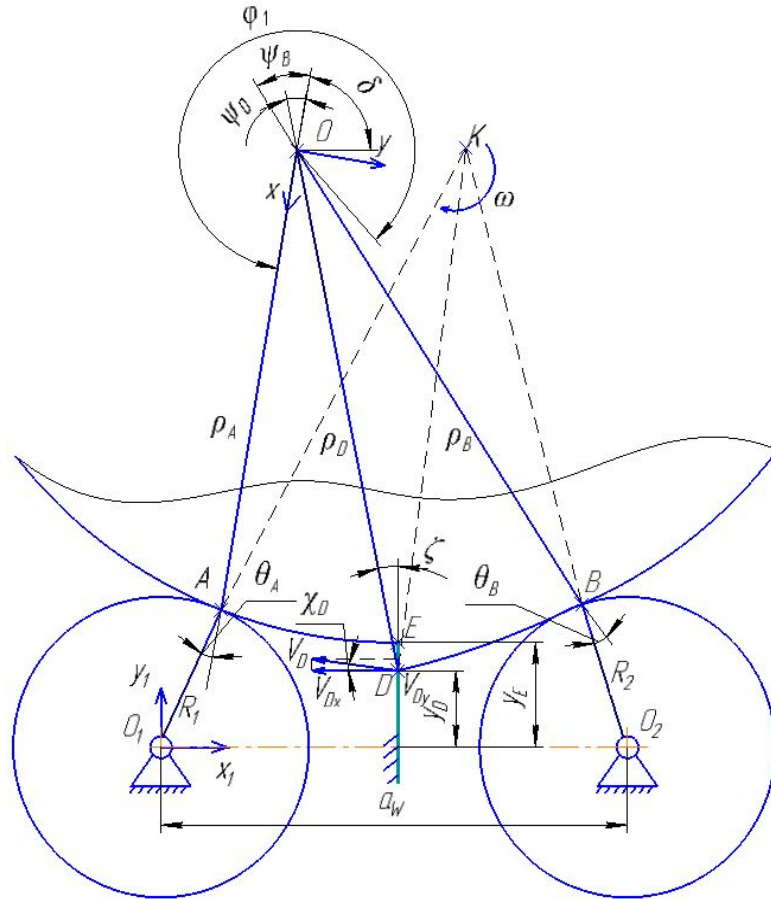


Рис. 2.19. Кинематическая модель механической обработки бандажа на роликах:  $R_1, R_2$  – радиусы опорных роликов;  $Y_1O_1X_1$  и  $YOX$  – декартовы системы координат, связанные соответственно с основанием и с бандажом;  $\delta$  – угол поворота оси  $OX$ ;  $\varphi_1$  – угол поворота бандажа;  $\rho_A, \rho_B, \rho_D$  – радиус-векторы точек на бандаже;  $\psi_B$  – составляющая полярного угла;  $\theta_A, \theta_B$  – углы направления нормалей;  $y_D, y_E$  – координаты точек контакта инструмента с бандажом; т.  $K$  – мгновенный центр скоростей;  $\chi_C, \chi_D$  – углы направления векторов скоростей т.  $D$ ;  $\omega$  – угловая скорость бандажа

Полученный результат нельзя считать окончательным. Если не рассматривать при дальнейшем движении бандажа возможность изменения радиуса  $\rho_{56}'(\varphi_1 + \psi_{56})$  и сразу перенести его конец в точку  $E$ , то это действие приведет к погрешности, зависящей от угла  $\zeta_5$  и длины отрезка  $ME$ . Тогда помимо получения недостоверной оценки обработанной поверхности, эта погрешность может нарушить монотонность функции  $\rho(\varphi)$ , что повлияет на устойчивость

вычислительного процесса и не позволит рассматривать формообразование на следующих рабочих ходах.

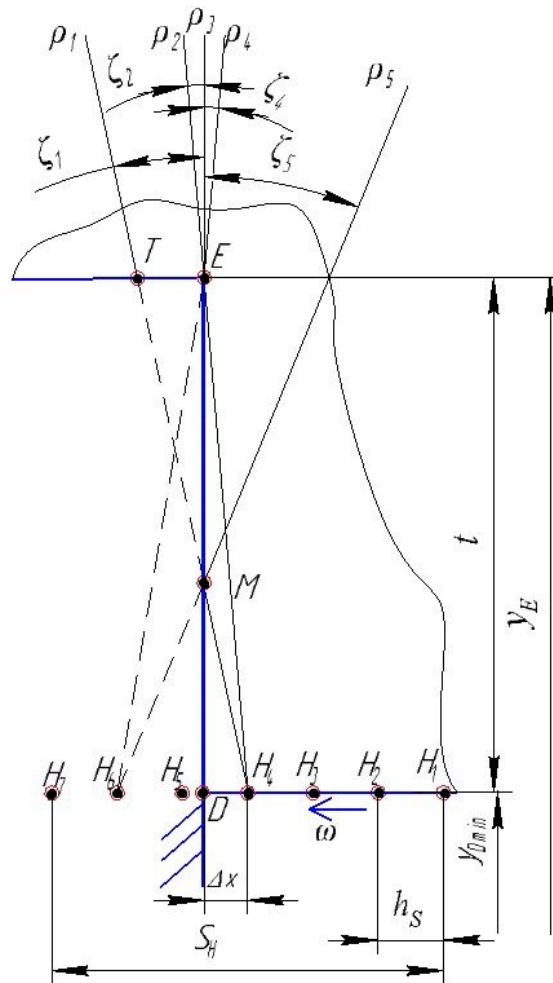


Рис. 2.20. Проверка на возможный контакт бандажа с инструментом: а) расчетная схема формообразования; б) блок-схема алгоритма расчета;  $\omega$  – угловая скорость бандажа

Кроме того возможны такие положения бандажа, при которых в результате резания удаляется часть не расположенного на наружной поверхности бандажа материала. Например, для точки  $H_4$  при  $\rho_{24}(\varphi_1 + \psi_{24})$  в точке  $E$  располагается уже вершина инструмента, а не материал бандажа. При продолжении поворота радиуса  $\rho_{14}(\varphi_1 + \psi_{14})$  на угол  $\zeta_1$  и отсутствии движения точки  $H_4$  произойдет удаление материала на участке  $MT$ .

Для того, чтобы учитывать такие изменения будем считать, что материал равномерно распределен вдоль каждого полярного радиуса профиля бандажа  $\rho = \rho(\varphi)$ . При этом расстояние  $h_s$  между точками профиля на наружной поверхности бандажа при номинальном радиусе 2425 мм и угловом шаге  $f_h = 0,0001$  рад составит не более  $h_s = 0,243$  мм. Поэтому можно считать, что и на

глубине резания  $t$  оно останется столь же малым. Это позволяет рассматривать обработку как результат удаления материала из тех точек на радиусах профиля бандажа, которые совпадают с проекцией инструмента.

Для достоверной формализации формообразования профиля каждая точка наружной поверхности профиля за один оборот бандажа должна участвовать в проверке на возможный контакт с инструментом:

$$\max(i)=\max(k)=2\pi/f_h,$$

где  $f_h$  – угловой шаг профиля  $\rho(\varphi)$  бандажа,  $i$  – индекс радиус-вектора в одномерном массиве точек, прошедших проверку,  $k$  – номер текущего положения бандажа  $k=(1+\varphi_1/f_h)$ .

Реализуя это условие, будем рассматривать движение точек профиля бандажа в окрестности режущей кромки. Если первая проверка для точки профиля проводится в положении бандажа  $k$  при  $j=1$ , а последняя в положении  $(k+j_{\max})$  при  $j=j_{\max}$  значит в каждом положении бандажа проходят проверку на возможный контакт с инструментом  $j_{\max}$  точек профиля бандажа.

Найдем  $j_{\max}$ . Сначала при  $\varphi_1=0$ ,  $k=1$  численным методом определяем полярный угол  $\varphi=\psi_H$  точки  $H$  на поверхности бандажа, которая с погрешностью  $\Delta x$  совпадает с проекцией  $DE$  инструмента. Затем, назначаем нечетное  $j_{\max}$  и вычисляем расстояние  $S_H$  между крайними точками проверяемого на возможный контакт с инструментом участка поверхности бандажа:

$$S_H=(j_{\max}-1)\cdot h_S.$$

Позиционируем  $S_H$  таким образом, чтобы точка  $H$  совпала с серединой  $S_H$ . Тогда полярные радиусы точек профиля, которые при этом положении бандажа должны участвовать в проверке на возможный контакт с инструментом:

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

где  $c=(j_{\max}-1)\cdot 0.5$ ,  $j=1\dots(c+1)$ . После поворота бандажа на угол  $\varphi_1=c\cdot f_h$  и далее необходимо в каждом положении рассматривать радиусы следующих точек при  $j=1\dots j_{\max}$ :

$$\rho_j=\rho(\varphi_1+\psi_H+(c+1-j)\cdot f_h). \quad (2.40)$$

По результатам проверочных расчетов установлено, что выбор  $j_{\max}$  рационально связывать с глубиной резания  $t$ . Тогда при  $S_H=t \cdot n \geq 1$  мм из (6):

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

Например, при  $t=0,5$  мм,  $n=2$ ,  $h_S=0,24$  мм получаем  $j_{\max}=5$ . При  $t=2$  мм,  $n=1$ ,  $h_S=0,24$  мм получаем  $j_{\max}=9$ .

Контакт бандажа с инструментом происходит, если конец вектора  $\rho_j$  расположен в зоне, ограниченной прямыми  $DE$  и  $ET$ , а в противном случае только при  $x_O \leq x_D = a_w \cdot 0,5$  и  $y_H \leq y_E$ . Тогда используя точки пересечения проверяемого радиус-вектора (2.40) с прямыми  $y=y_E$  и  $x=x_D$ , соответственно вычисляли его новую длину:

$$\rho'_j = \sqrt{(y_O - y_E)^2 + (tg(\zeta_j) \cdot (y_O - y_E))^2}, \quad (2.41)$$

$$\rho'_j = \sqrt{(x_O - x_D)^2 + \left(\frac{x_O - x_D}{tg(\zeta_j)}\right)^2}, \quad (2.42)$$

сохраняя результат в массиве данных профиля взамен предыдущего значения для этого положения:

$$\rho(\varphi_1 + \psi_H + (c+1-j) \cdot f_h) = \rho'_j \quad (2.43)$$

Вычисляя скорость той точки профиля, которая находится в контакте с инструментом, определяем изменение скорости резания  $V_{Dx}$  в каждом положении бандажа. Величина и направление вектора скорости этой точки (рис. 2.19):

$$v_D = \omega \cdot \sqrt{(x_{1D} - x_{1K})^2 + (y_{1K} - y_{1D})^2} \quad \text{и} \quad \chi_D = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{y_{1K} - y_{1D}}{x_{1D} - x_{1K}}.$$

Скорость резания (касательная подача при шлифовании):

$$V_{Dx} = V_D \cdot \cos(\chi_D). \quad (2.44)$$

Вертикальная составляющая:  $V_{Dy} = V_D \cdot \sin(\chi_D)$ .

## 2.4. Выводы

1. Обоснованы параметры для идентификации в расчетных моделях погрешностей формы бандажей и расположения опорных роликов.

2. Разработан алгоритм определения отклонения от круглости поперечного сечения бандажа.



3. Сравнением контактных напряжений известных из литературных источников с результатами проверочных расчетов напряженно-деформированного состояния поверхности на пятне контакта бандажа и ролика, выполненных в разработанной конечно-элементной модели, доказана ее достоверность.

4. Предложено оценивать изменения состояния поверхности качения в процессе восстановительной обработки бандажа путем идентификации группы опасности, к которой относятся расчетные контактные напряжения. Определены границы допустимых напряжений для трех групп опасности.

5. Сформулированы условия, при которых возможно использование разработанной кинематической модели для оценки формообразования бандажа при обработке переносными станками с ДСС, УВС-М и СПК.

### 3. Моделирование восстановительной обработки поверхностей качения бандажей

#### 3.1. Анализ исходных условий перед восстановительной обработкой

Особенности конструкции вращающейся печи, погрешности формы и расположения ее деталей влияют на технологический процесс резания материала бандажа, а результат обработки в свою очередь влияет на функционирование вращающейся печи. Поэтому сначала с целью определения необходимых для настройки переносных станков параметров рассмотрим движение и состояние поверхности качения бандажа с учетом погрешности формы его поперечного сечения.

##### 3.1.1. Перемещения бандажа с погрешностями формы

Обозначим римскими цифрами девять точек (с угловым шагом  $40^\circ$ ) на поверхности качения бандажа с профилем *Cam* (см. п. 2.1.3) при  $\Delta R=20$  мм и отклонением от круглости  $EFK_0=6$  мм. Найдем траектории этих точек, а также траекторию геометрического центра бандажа т. *O*, при его вращении на роликах с радиусом  $R=750$  мм и межосевым расстоянием роликкоопор  $a_w=3175$  мм.

Загружая в программе *Motion.m* (п. 2.3.1) файл *FormCam2.mat* с полярными координатами профиля *Cam*, вычисляем координаты точек:

$$[y_I(\varphi_1), x_I(\varphi_1)], [y_{II}(\varphi_1), x_{II}(\varphi_1)], \dots [y_{IX}(\varphi_1), x_{IX}(\varphi_1)],$$

где  $\varphi_1$  – угол поворота бандажа в радианах, за один оборот бандажа в диск  $Y_1O_1X_1$  (рис. 2.16) с угловым шагом  $f_h=0,0001$  для 62832 положений (номер положения  $k$  определяется как  $k=\varphi_1/f_h$ ).

Результаты расчетов (рис. 3.1) демонстрируют, что точки I..IX при бесцентровом вращении вследствие погрешности формы бандажа перемещаются по разным траекториям, которые совпадают друг с другом только в точках *A*, *B*, *F* и *G*. Причем закономерности их движения повторяются в зеркально расположенных зонах соответственно дугам *AB*, *FG* и *BG*, *AF*.

Мгновенный центр скоростей т. *K* (рис. 2.16) является подвижным, образуя при этом симметричную траекторию  $y_K=y_K(\varphi_1)$ ,  $x_K=x_K(\varphi_1)$  (рис. 3.2), которая

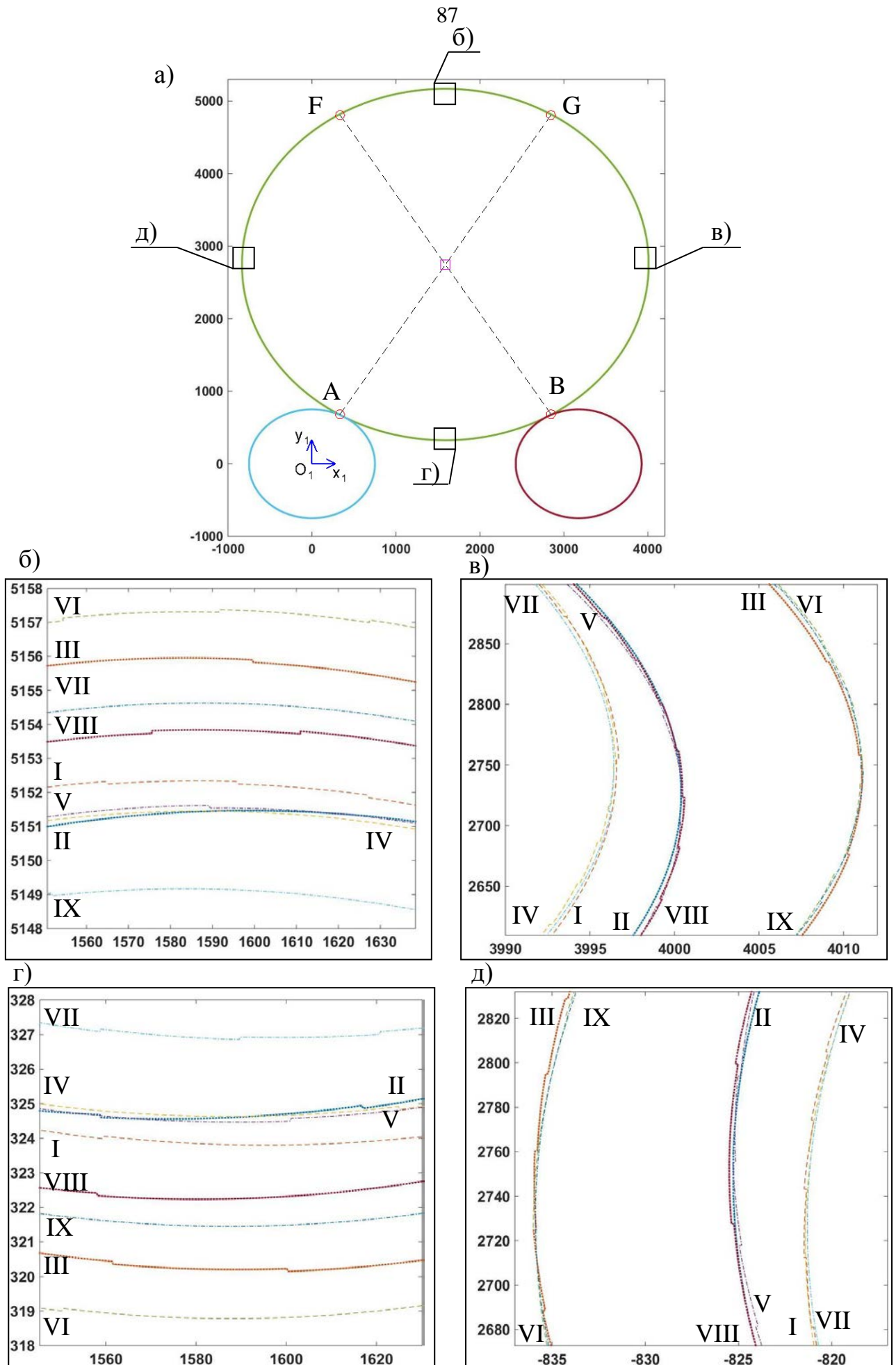


Рис. 3.1. Траектории точек (с полярными координатами в пск бандажа, град: I – 0, II – 40, III – 80, IV – 120, V – 160, VI – 200, VII – 240, VIII – 280, IX – 320) профиля *Cam* ( $\Delta R=20$  мм) в дск  $Y_1 O_1 X_1$  полученные в программе *Motion* при  $a_w = 3175$  мм,  $R=750$  мм

свидетельствует о неравномерности движения точек профиля бандажа при его постоянной угловой скорости.

Геометрический центр т.  $O$  бандажа перемещается по траектории  $y_o=y_o(x_o)$ ,  $x_o=x_o(\varphi_1)$ , имеющей форму ромба (рис. 3.2). Габариты этой траектории по вертикали 4,68 мм, а по горизонтали 7,63 мм.

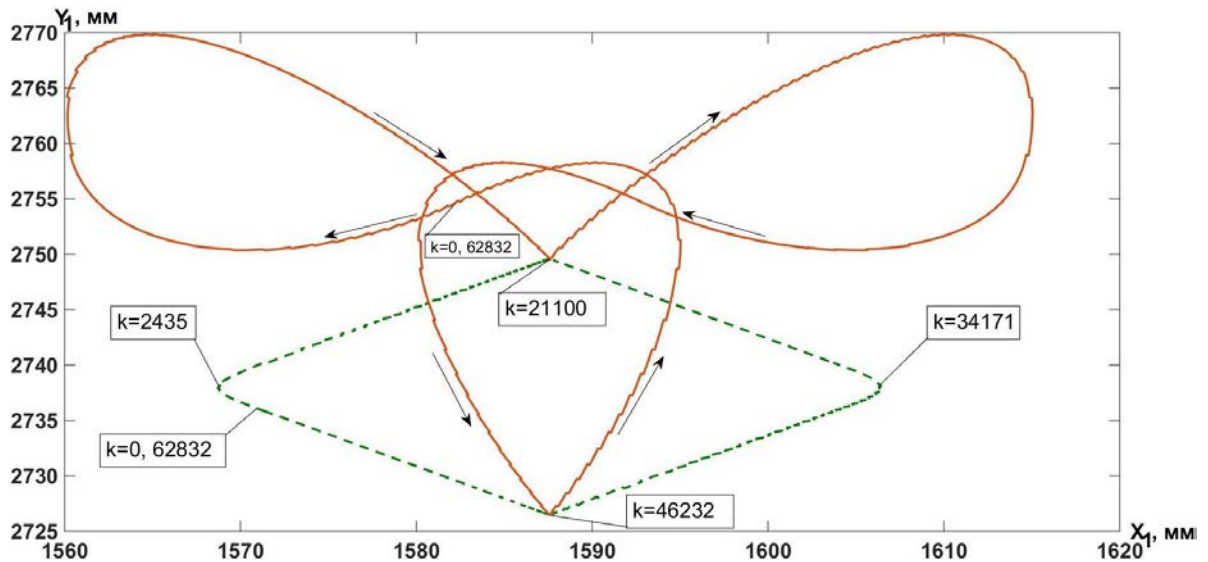


Рис. 3.2. Результаты моделирования движения профиля *Cam* ( $\Delta R=20$  мм) в диск  $Y_1O_1X_1$  при  $a_w=3175$  мм,  $R=750$  мм: траектории центра бандажа т.  $O$  (штриховая) и мгновенного центра скоростей т.  $K$  (сплошная), где  $k=\varphi_1/0,0001$

Следовательно, во-первых, вместе с бандажом над этой опорой перемещается и корпус вращающейся печи. Это вызывает вредные сопротивления движению, влияет на усталостную прочность корпуса вращающейся печи и состояние его футеровки. Исключение таких негативных движений корпуса является одной из основных задач восстановительной обработки бандажа.

Во-вторых, бандаж совершает сложное плоскопараллельное движение относительно фундамента опоры. Поэтому для контролируемой механической обработки инструмент должен или располагаться неподвижно в специальных зонах (на рис. 3.1 зоны  $AB$  или  $FG$ ), или совершать такие движения, при которых обрабатываемая поверхность будет перемещаться относительно него также, как поверхность закрепленной в центрах вращающейся заготовки. Это условие, как правило, учтено и реализовано в конструкциях переносных станков (см. п. 1.3).

Рассмотрим подробнее движение поверхности качения бандажа между точками  $A$  и  $B$  (рис. 3.1). Выясним, от чего зависит измеренное вдоль

вертикальной прямой расположенной посередине межосевого расстояния роlikоопоры (или при  $x_D=a_w/2$ ) биение бандажа  $ECR$ .

Из индикаторной диаграммы  $y_D=f(\varphi_1)$  (рис.3.3), где  $\varphi_1$  – угол поворота бандажа,  $y_D$  – расстояние от точки  $D$  контакта с бандажом штока индикатора до оси  $O_1X_1$  (неподвижной декартовой системы координат  $Y_1O_1X_1$  с центром в т.  $O_1$  на оси опорного ролика) находим радиальное биение бандажа:

$$ECR = y_{Dmax} - y_{Dmin}, \quad (3.1)$$

где  $y_{Dmax}$  и  $y_{Dmin}$  – соответственно максимальное и минимальное значения функции  $y_D=f(\varphi_1)$ . Для профиля *Cam* с  $EFK_0=6$  мм при  $a_w=3175$  мм и  $R=750$  мм получаем  $ECR=8,77$  мм (табл. 3.1).

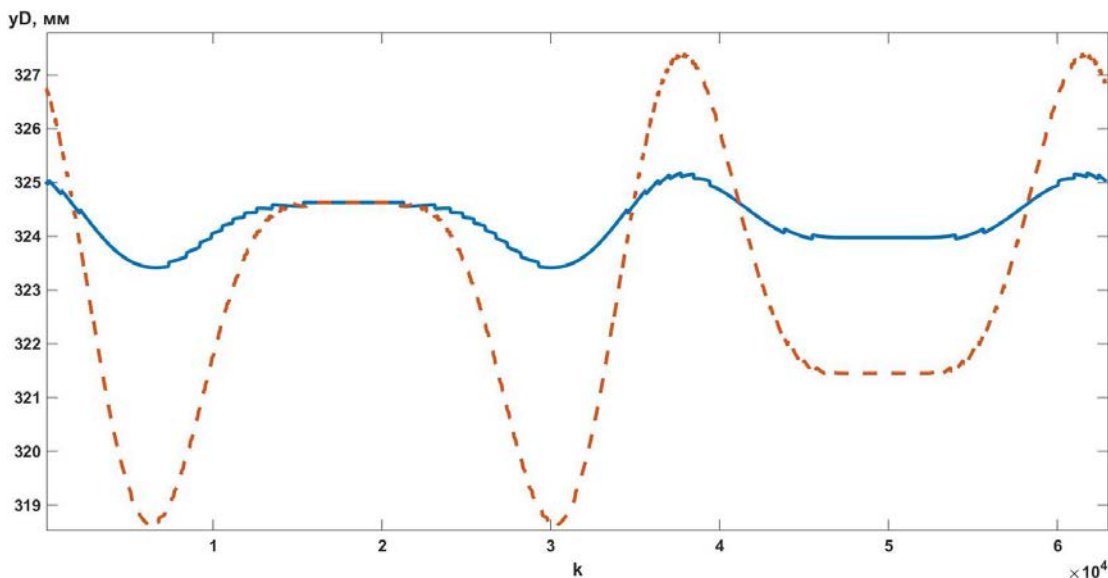


Рис. 3.3. Изменение индикаторной диаграммы  $y_D=f(k)$  (где  $k=\varphi_1/0,0001$ ) при моделировании движений бандажа с исходным профилем *Cam* при  $a_w = 3175$  мм,  $R=750$  мм: штриховая линия при  $\Delta R=20$  мм, сплошная при  $\Delta R=2$  мм

Построим индикаторную диаграмму и найдем  $ECR$  для профиля *Cam* с  $EFK_0=1,33$  мм, т.е. меньшей в пять раз разницей  $\Delta R=R_H - R_0$  между максимальным  $R_H$  и минимальным  $R_0$  радиусами профиля при прежних остальных параметрах. В этом случае получаем, что биение  $ECR=1,79$  мм (табл. 3.1) меньше предыдущего в 4,93 раза.

Таким образом, при измерении посередине между опорами размах индикаторной диаграммы пропорционален отклонению от круглости профиля бандажа *Cam*.

Для того, чтобы оценить влияние формы поперечного сечения бандажа на величину радиального биения при тех же исходных данных ( $R=750$  мм и  $a_w=3175$  мм), построим индикаторные диаграммы и найдем  $ECR$  для профилей *Cone*, *Cassini*, *Camomile* и *Corner* при условии, что  $\Delta R=2$  мм для каждого профиля (рис. 3.4).

Результаты расчетов (табл. 3.1) показывают, что величина размаха индикаторной диаграммы при прочих равных условиях зависит от формы профиля. Наименьшее  $ECR=0,9$  мм у профиля *Cassini*, а наибольшее  $ECR=3,5$  мм у профиля *Camomile*.

Таблица 3.1

Параметры движения бандажей с погрешностями формы

Профиль	Параметр профиля бандажа, мм	Отклонение от круглости по ГОСТ Р 53442-2009, мм	Межосевое расстояние роликоопор, мм	Радиальное биение бандажа, мм	Экстремумы индикаторной диаграммы, мм		Положение бандажа		Максимальная скорость резания, м/мин	Неравномерность скорости резания за оборот бандажа
					$\Delta R$	$EFK_0$	$a_w$	$ECR$		
<i>Cam</i>	20	6,33	3175	8,77	318,64	327,41	37808	6192/ 30417	15,4	0,0185
	2	1,33	3175	1,79	323,38	325,16	38281/ 61181	6307/ 30342	15,4	0,0185
			635	0,67	129,93	130,6	2942/ 41683	10117/ 34526	16,5	0,0886
<i>Cone</i>	2	1,94	3175	3,21	322,26	325,47	3285	61053	15,3	0,0048
			635	1,04	129,81	130,86	62417	1345	15,24	0,0008
	20	19,31	3175	31,65	301,45	333,11	4451	61019	15,85	0,0487
<i>Cassini</i>	2	2	3175	0,9	323,99	324,89	10393/ 41809	26055/ 57572	15,26	0,0014
			635	0,05	130,31	130,36	18060	61595	15,24	0,0008
	20	20	3175	8,61	318,73	327,34	10408	26132	15,46	0,0135
<i>Camomile</i>	2	2	3175	3,5	322,89	326,39	17424	8910	15,3	0,0036
			635	0,35	130,15	130,50	4016	496	15,44	0,013
	20	20	3175	32,8	311,83	344,63	15513	7865	16,23	0,0722
<i>Corner</i>	2	2	3175	2,39	323,38	325,76	30141	20923	15,87	0,0417
			635	2,02	129,33	131,35	62426	28943	15,25	0,0016

Кроме того, путем увеличения  $\Delta R$  в 10 раз для каждого профиля, построения индикаторной диаграммы и определения  $ECR$  подтверждена пропорциональность между отклонением от круглости и размахом индикаторной диаграммы (табл. 3.1).

Рассмотрим влияние на биение бандажа *ECR* расстояния  $a_w$  между центрами вращения опорных роликов. Для этого изменим исходные данные, связанные с базированием бандажа. Уменьшим эти размеры в пять раз, принимая радиусы роликов  $R=150$  мм, а межосевое расстояние  $a_w=635$  мм.

Не изменяя форму и размеры профилей бандажей, в результате расчетов, получаем (табл. 3.1) для всех вариантов, кроме профиля *Corner* существенное уменьшение размаха индикаторной диаграммы.

Это объясняется тем, что уменьшение  $a_w$  изменяет длину хорды дуги  $AB$ , а, следовательно, и длину ее стрелки, которая является составляющей размаха, изменяясь при изменении радиуса  $\rho(\varphi_1)$  профиля бандажа.

Перейдем к вопросу об использовании индикаторной диаграммы для настройки перед началом обработки переносного станка, расположенного между опорами.

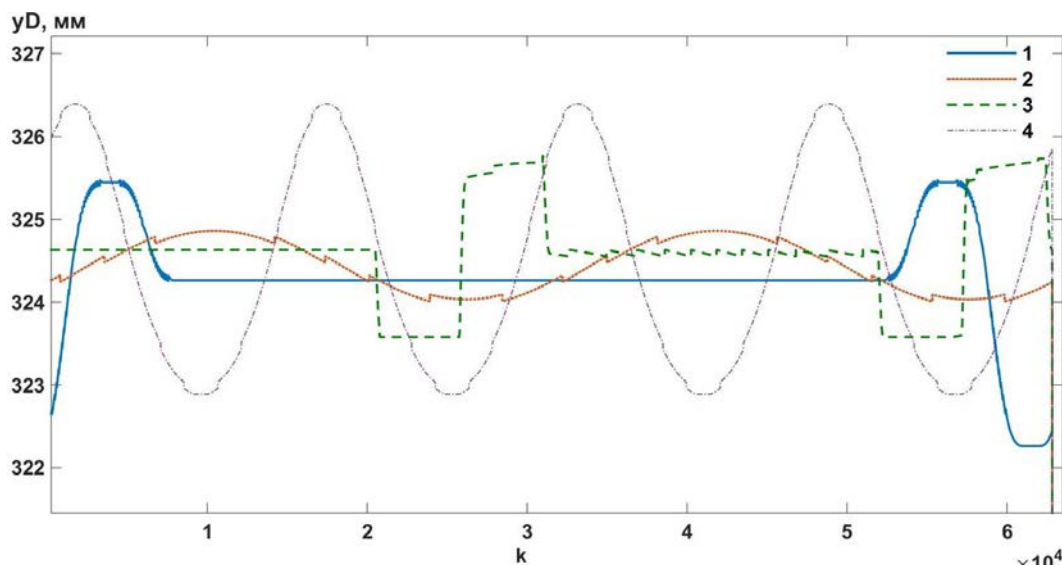


Рис. 3.4. Изменение индикаторных диаграмм при моделировании движений бандажей с  $\Delta R=2$  мм для профилей: 1 – *Cone*, 2 – *Cassini*, 3 – *Corner*, 4 – *Camomile*

Для того, чтобы исправить погрешность формы бандажа, необходимо прежде всего удалить материал с той поверхности профиля, которая вызывает биения. Поэтому найдем те положения бандажа, при которых эта поверхность взаимодействует с индикатором (учитывая возможность его замены перед обработкой на инструмент).

Используем индикаторную диаграмму  $y_D=f(\varphi_1)$  профиля *Cone* (рис. 3.4). Максимальные значения  $y_{D\max}=325,47$  мм этой функции возникают в положениях

бандажа  $k=3285$  и  $k=56924$ . При этом единичный выступ взаимодействует с опорными роликами. Крайнее нижнее положение индикатора  $y_{D\min}=322,26$  мм при положениях бандажа от  $k=61053$  до  $k=61983$  вызывается воздействием на индикатор поверхности выступа с постоянным радиусом  $R_H=2425$  мм.

При положениях бандажа от  $k=7392$  до  $k=52810$  индикатор неподвижен ( $y_{D\lambda}=324,26$  мм), так как он и опорные ролики взаимодействуют с профилем бандажа на участке окружности постоянного радиуса  $R_O=2423$  мм.

Следовательно, максимумы функции  $y_D=f(\varphi_1)$  зависят от  $\Delta R$  профиля. При  $\Delta R \rightarrow 0$  получим  $y_{D\max} \rightarrow y_{D\lambda} = 324,26$  мм, т.е. индикаторная диаграмма в этом случае стремится к прямой линии. Поэтому положительную амплитуду ( $y_{D\max} - y_{D\lambda}$ ) функции  $y_D=f(\varphi_1)$  не следует использовать, например, для выбора глубины резания, т.к. она возникает в тех положениях, когда с индикатором не взаимодействует поверхность бандажа, вызывающая биения.

Отрицательная амплитуда ( $y_{D\min} - y_{D\lambda}$ ) приближаясь при  $\Delta R \rightarrow 0$  снизу к  $y_{D\lambda}$ , наоборот непосредственно характеризует процесс изменения погрешности формы. Поэтому в начале неуправляемой обработки для выполнения условия  $\Delta R \rightarrow 0$  координата  $y_E$  вершины инструмента должна удовлетворять неравенству:

$$y_E > y_{D\min}. \quad (3.2)$$

Эта закономерность подтверждается при анализе индикаторных диаграмм профилей *Cam*, *Cassini*, *Cone* и *Corner* (рис. 3.4). Вместе с тем особенности этих профилей демонстрируют то, что условие (3.2) является не достаточным для выбора параметров процесса резания, потому что остается неясным ограничение  $y_E$  сверху.

Например, индикаторная диаграмма профиля *Cam* (рис. 3.3) имеет два прямолинейных участка с  $y_{D\lambda 1} > y_{D\lambda 2}$ . В этом случае нельзя выделить ни отрицательную, ни положительную амплитуды. Поэтому требует изучения вопрос о том, до какого значения  $y_E$  после выполнения условия (3.2) следует продолжать обработку.



При восстановительной обработке бандажа скорость резания  $V_{DX}$  (касательная подача при шлифовании) (рис. 2.19) зависит от числа оборотов  $n$  корпуса вращающейся печи и погрешностей профиля бандажа. Она определяется по уравнению (2.42) как составляющая абсолютной скорости точки  $D$ , расположенной в месте пересечения траекторий точки поверхности бандажа и индикатора.

Из результатов расчетов (табл. 3.1) следует, что при  $n=1$  об/мин,  $\Delta R=2$  мм для всех рассматриваемых профилей  $V_{DX}$  изменяется в диапазоне 15,24...16,5 м/мин. Наибольшая неравномерность:

$$\delta_V = 2 \cdot \left( \frac{V_{DX \max} - V_{DX \min}}{V_{DX \max} + V_{DX \min}} \right)$$

движения  $\delta_V=0,0886$  получена для бандажа с профилем *Cam* (при  $R=150$  мм и  $a_w=635$  мм).

Взаимодействие бандажа и индикатора сопровождается и незначительной вертикальной скоростью в диапазоне от 0,0340 м/мин до 0,0325 м/мин.

### **3.1.2. Экспериментальная проверка математической модели обработки бандажа**

Для проверки достоверности математической модели обработки с неравномерным распределением припуска по поверхности катания бандажа разработана физическая модель этого процесса (рис. 3.5).

Она основана на обеспечении такого взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, при котором процессы резания и формообразования не отличаются от процессов, возникающих при восстановительной обработке бандажа на практике.

Выполнение этого условия подобия, прежде всего, зависит от закономерности изменения взаиморасположения обрабатываемой поверхности и режущей кромки инструмента. Например, при неподвижном инструменте, установленном между опорами относительно него совершает сложное движение бандаж на опорных роликах. Подобно этому в физической модели, во-первых, должен перманентно сохраняться контакт обрабатываемой поверхности с

роликами, которые шарнирно установлены на одном основании с инструментом. Во-вторых, если точки обрабатываемой поверхности двигаются по окружностям с постоянными радиусами (вращение вокруг неподвижного центра), это основание должно быть подвижно. При этом, как следует из проверочных расчетов, выполненных в программе *Motion*, каждая точка основания, расположенная на его оси симметрии, будет двигаться (относительно неподвижной декартовой системы координат) по траектории, которая имеет форму траектории геометрического

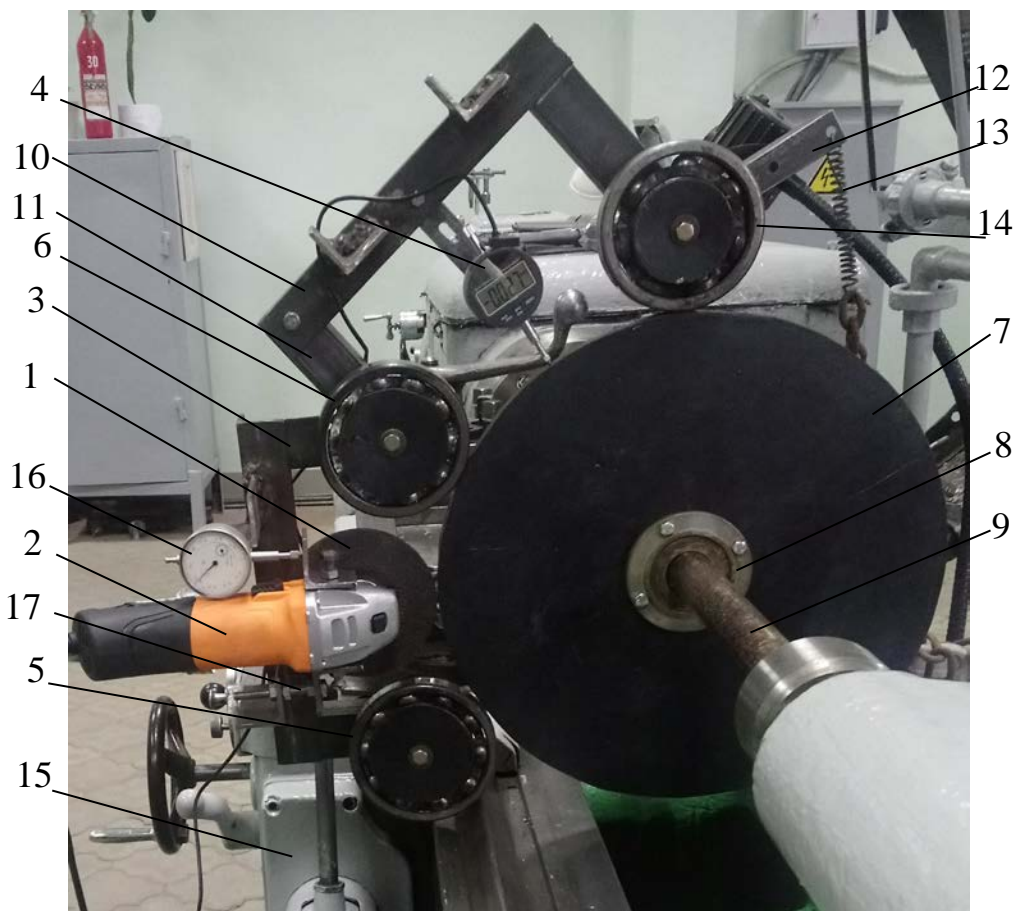


Рис. 3.5. Физическая модель восстановительной обработки с неравномерным распределением припуска по поверхности катания бандажа переносными станками с ДСС центра бандажа при его бесцентровом вращении на опорных роликах (см. рис. 3.2).

Поэтому в экспериментальной установке (рис. 3.5) для реализации такой траектории инструмент 1 вместе с приводом главного движения 2 закреплен на раме 3, а ее подвижность относительно стойки зафиксированной в резцедержателе токарного станка 15 выполняется путем шарнирного закрепления на подпружиненной оси. При этом силы упругости пружин обеспечивают также

перманентный контакт роликов 5 и 6 (шарнирно установленных на раме 3) с наружной поверхностью заготовки 7. Тем самым имитируется контакт обрабатываемой поверхности бандажа с его опорными роликами.

Заготовка 7 имеет форму диска, закрепленного болтами на фланце 8, зафиксированного на валу 9, один конец которого установлен в шпинделе токарного станка 4, а второй поджат вращающимся центром задней бабки. Заготовке 7 можно задавать любое отклонение от круглости, подготавливая ее профиль путем изменения радиуса наружной поверхности.

Например, для выполнения экспериментов была изготовлена заготовка (с максимальным радиусом  $R_{HZ}=200$  мм и параметром погрешности профиля  $\Delta R_Z=2$  мм), имитирующая профиль бандажа с погрешностью *Cam* (см. п. 2.1.2) при  $R_H=2425$  мм,  $\Delta R=24,25$  мм. Масштабный коэффициент, необходимый для выполнения условия геометрического подобия:

$$\mu = R_H \cdot 0,001 / R_{HZ} = 2425 \cdot 0,001 / 200 = 0,0121 \text{ м/мм.}$$

Тогда экспериментальная установка должна иметь следующие основные размеры: расстояние между осями роликов 5 и 6  $a_{wz}=262$  мм, а их радиусы  $R_Z=62$  мм. Необходимо отметить, что возможность исследования исправления погрешности формы профиля определяется условием  $\Delta R_Z \geq 1$  мм, и, следовательно, с учетом  $\mu$  на этой установке можно моделировать только восстановление геометрической точности бандажей с  $\Delta R=12$  мм, т.е. в пределах не ниже 14-15 степени точности.

Для обеспечения измерения в процессе обработки радиального биения заготовки 7 используется подпружиненный кронштейн, который копирует движения рамы 3. Он состоит из г-образной рамы 10 (рис. 3.5) с закрепленными на ней стержнями 11, 12 и индикатором 4. Стержень 11 шарнирно установлен на ось ролика 6, а стержень 12 связан с пружиной 13, под воздействием которой ролик 14 взаимодействует с поверхностью заготовки 7. При этом межосевое расстояние между роликами 6 и 14 равно  $a_{wz}=262$  мм, а радиус ролика 14  $R_Z=62$  мм.

Для установки глубины резания используется индикатор 16 и регулировочный узел 17, а для перемещения рамы 3 в осевом направлении – продольный привод резцедержателя станка 15.

Подпружиненный кронштейн можно использовать для экспериментального моделирования обработки бандажа станком СПК. Тогда в конструкции экспериментальной установки выполняются следующие изменения (рис. 3.6). На раму 3 устанавливается индикатор 4 и в определенной точке, согласно расположению опорного шарнира 5 СПК, закрепляется стержень 11. Рама 10 шарнирно прикрепляется к стержню 11 и через ролик 12 ( $R_Z=15$  мм) благодаря

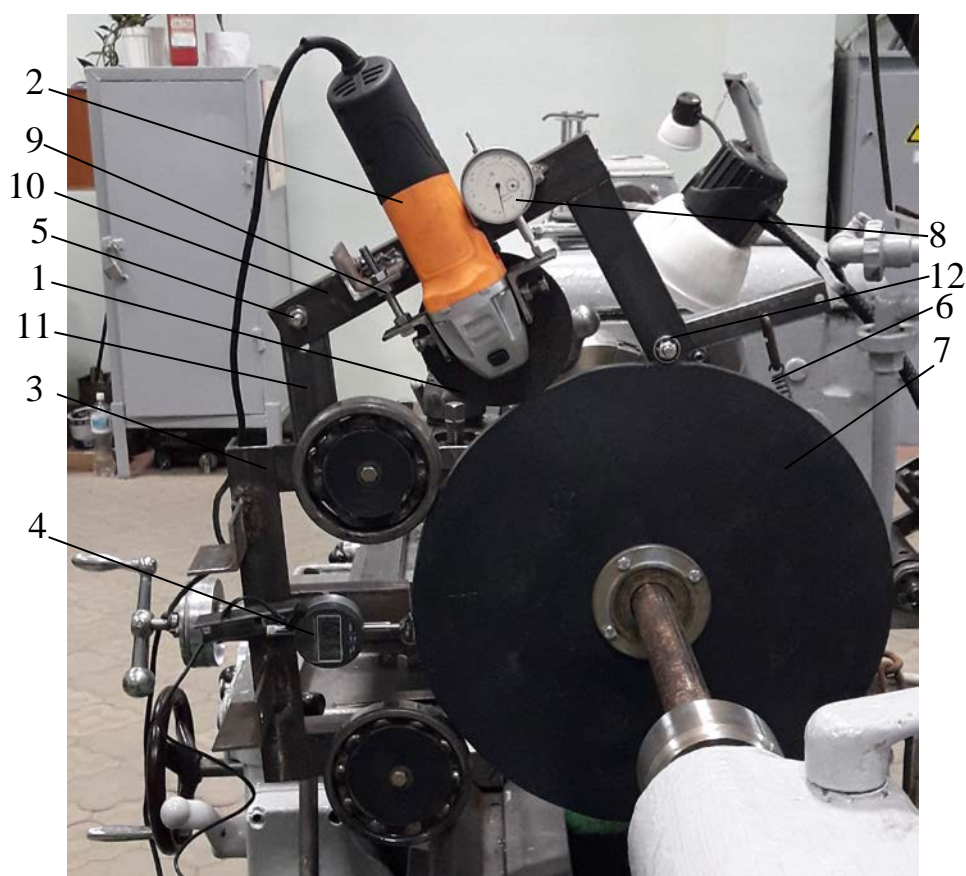


Рис. 3.6. Физическая модель восстановительной обработки с неравномерным распределением припуска по поверхности бандажа переносным станком СПК

пружине 6 взаимодействует с заготовкой 7. Положение на раме 10 инструмента 1 вместе с приводом главного движения 2 контролируется индикатором 8 и изменяется колебательными прокладками в регулировочном узле 9 (рис. 3.6).

Число оборотов  $n$  заготовки 7 определяется из условия равенства скоростей точек на наружных поверхностях ее и бандажа. Тогда если бандаж совершает

один оборот в минуту, то скорость точки, расположенной на его поверхности с радиусом  $R_H=2425$  мм, равна  $V=0,254$  м/с и  $n$  должно быть:

$$n = 30 \cdot V / (\pi \cdot R_{HZ}) = 30 \cdot 0,254 / (3,14 \cdot 0,2) = 12,1 \text{ об/мин.}$$

Этому условию удовлетворяет  $n_{\min}=12,5$  об/мин шпинделя токарного станка 1К62, использованного при проведении экспериментов.

Для обработки заготовки 7 в экспериментальной установке применялся шлифовальный диск Makita (741472) 125x6x22.23 мм А 36Р - ВF (электрокорунд, средней зернистости и твердости связки синтетическими смолами с армированием стекловолокном и допустимой окружной скоростью до 80 м/с), который устанавливался на угловую шлифовальную машину УШМ-125/900 (частота вращения холостого хода  $n_{\text{УШМ}}=11000$  об/мин). Скорость резания:

$$V = \pi \cdot n_{\text{УШМ}} \cdot 0,125 / 60 = 3,14 \cdot 11000 \cdot 0,125 / 60 = 72 \text{ м/с.}$$

Для идентификации биения в процессе вращения заготовки 7 показания цифрового индикатора 4 сохранялись на компьютере в файле *Excel* (\*.xls) с интервалом в 1 с (это ограничение связано с возможностями интерфейса индикатора). Период изменения радиального биения соответствует одному обороту заготовки 7 за 5 с. Для построения индикаторной диаграммы пять точек недостаточно. Поэтому в процессе обработки дополнительно выполнялась видеозапись показаний индикатора в файл типа mp4 с параметрами: ширина и высота кадра соответственно 1920 и 1080 пикселей, а частота  $\nu=50$  кадров в секунду. Таким образом, из этих файлов за один оборот заготовки 7 определялось 25 показаний индикатора.

Перед началом экспериментов выполнялось компьютерное моделирование в программе *Working.m* [94] (приложение 3, П. 3.4). Сначала вычислялись рациональные режимы и параметры обработки заготовки 7. В частности, было установлено, что для исправления погрешности формы профиля *Cam* заготовки 7 круглым встречным шлифованием с глубиной резания  $t=0,1$  мм при исходных данных экспериментальной установки достаточно выполнить 6 рабочих ходов.

Затем в процессе математического моделирования восстановительной обработки на каждом рабочем ходе сохраняли полученную индикаторную функцию  $Y_{DW} = f_{DW}(k_a)$ , где  $k_a$  – положение бандажа, а  $W$  – номер рабочего хода.

Экспериментальное моделирование обработки бандажей проводилось в одинаковой последовательности как для станка УВС-М, так и для СПК.

Сначала за пять оборотов заготовки 7 с исходным профилем бандажа *Cam* ( $R_H=2425$  мм,  $\Delta R=24,25$  мм) сохранялись показания индикатора. Привод главного движения фиксировался в таком положении, при котором инструмент 1 касался только поверхности заготовки с максимальным радиусом.

Затем в регулировочный узел устанавливалась прокладка, толщина которой равна глубине резания  $t$ . Выполнялся первый рабочий ход и потом на протяжении пяти оборотов заготовки сохранялись показания индикатора. После изменения в

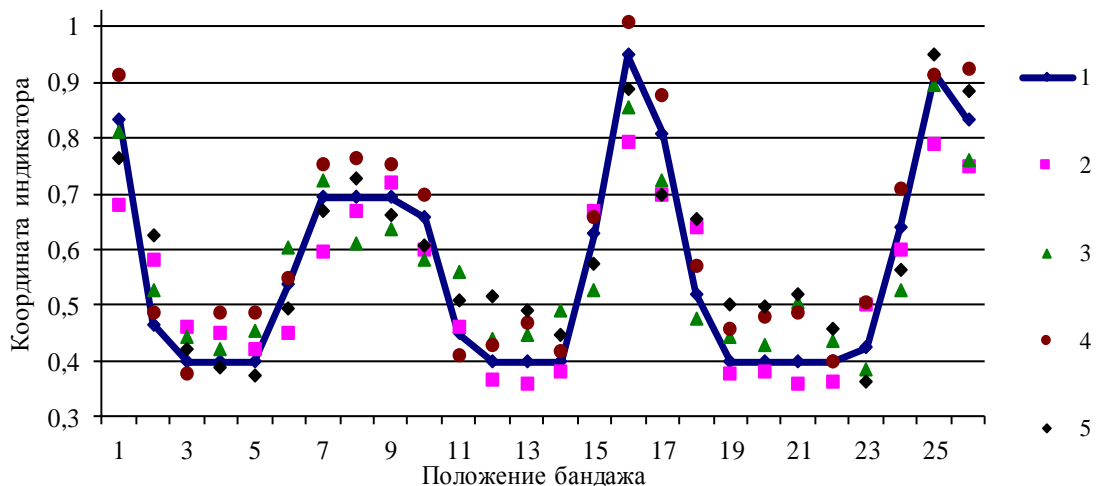


Рис. 3.7. Координаты индикатора, полученные при математическом и физическом моделировании (соответственно кривая  $Y_{D4}(k_a)$ , и точечные диаграммы  $y_{41}(k_a)$ ,  $y_{42}(k_a)$ ,  $y_{43}(k_a)$  и  $y_{44}(k_a)$ ) после четвертого рабочего хода в процессе обработки на станке УВС-М исходного профиля *Cam* ( $R_{H2}=200$  мм,  $\Delta R=2$  мм)

начале каждого следующего рабочего хода положения инструмента эти действия повторялись.

Измерения положения индикатора выполнялись с одинаковой точностью и сопровождалась переменной погрешностью (рис. 3.7). Поэтому для построения индикаторных диаграмм сначала экспериментальные данные обрабатывались, а затем вычислялось радиальное биение.

При этом предполагалось, что результаты измерений координат индикатора  $y_{wi} = f_{wi}(k_a)$  в каждом положении  $k_a$  бандажа при  $i$ -ом цикле (повороте) его движения после рабочего хода с номером  $W$  подчинены нормальному закону распределения вероятностей, а математическое ожидание  $y_{ew} = f_{ew}(k_a)$  с вероятностью 0,95 лежит внутри доверительного интервала:

$$\varepsilon(k_a) = T_{\text{табл.}} \cdot \sigma(k_a) / (5)^{0.5} = 1,1496 \cdot \sigma(k_a), \quad (3.3)$$

где  $T_{\text{табл.}}$  – табличное значение при  $n=5$  распределения Стьюдента  $T_{\text{табл.}}(n-1; \alpha/2) = T_{\text{табл.}}(4; 0,025) = 2,5706$ ;  $\sigma(k_a)$  – среднеквадратическое отклонение.

Для сравнения результатов математического и экспериментального моделирования использовались функции соответственно  $Y_{DW} = f_{DW}(k_a)$  и  $y_{ew} = f_{ew}(k_a)$ . Для них сначала определялась абсолютная погрешность:

$$\Delta_a(k_a) = |Y_{DW}(k_a) - y_{ew}(k_a)|,$$

коэффициент корреляции и разница радиальных биений, а затем для функции  $\Delta_a(k_a)$  – показатели сравнения: среднее арифметическое, стандартное отклонение и коэффициент вариации (табл. 3.4).

Таблица 3.4

**Параметры отклонения результатов компьютерного и физического моделирования обработки на станке СПК профиля *Cam* ( $R_n=2425$  мм,  $\Delta R=24,25$  мм) бандажа**

Номер $W$ рабочего хода	Максимальная абсолютная погрешность, мм	Среднее отклонение, мм	Среднеквадратическое отклонение, мм	Коэффициент вариации	Коэффициент корреляции	Разница биений, мм
0	0,12	0,06	0,032	51,55	0,962	0,072
1	0,117	0,062	0,029	47,32	0,956	0,089
2	0,238	0,103	0,061	59,03	0,875	0,16
3	0,224	0,108	0,052	47,43	0,801	0,120
4	0,225	0,119	0,047	39,26	0,546	0,086
5	0,179	0,085	0,042	49,81	0,04	0,07

Примечание: Результаты измерений перед началом обработки расположены в первой строке таблицы ( $W=0$ ).

Эти результаты, прежде всего, продемонстрировали существенную корреляцию закономерностей изменения индикаторных функций, полученных при математическом и физическом моделировании. Абсолютная погрешность между ними не превышает 25%, стандартное отклонение составляет тысячные

доли мм, а коэффициент корреляции, за исключением 4 и 5 рабочих ходов, больше чем 0,8.

Наилучшее совпадение результатов получено перед обработкой ( $W=0$ ). При этом неоднородность функции  $\Delta_a(k_a)$  (коэффициент вариации больше 33%) связана с влиянием погрешностей экспериментальной установки. На 4 и 5 рабочих ходах она настолько существенна, что делает невозможным (коэффициент корреляции близок к нулю) сравнение теоретической и экспериментальной индикаторных диаграмм. На этих переходах совпадение результатов подтверждает только разница биений. Она меньше чем 0,1 мм (табл. 3.4).

После шестого рабочего хода ( $W=6$ ) радиальное биение лежит в пределах погрешности измерения, что доказывает адекватность рассчитанных в математической модели параметров режима обработки, необходимых для исправления погрешности формы как станками УВС-М и ДСС, так и СПК.

Таким образом, кинематическая модель системы бандаж-ролики-станок и математическая модель неравномерного распределения припуска достоверно описывают процесс формообразования поверхности катания бандажа при его обработке.

### **3.2. Моделирование контактного взаимодействия бандажа с опорным роликом**

Исследуем с помощью, рассмотренной в п. 2.2.3 конечно-элементной модели влияние процесса резания на контактную прочность поверхности катания бандажа и его базирование на опорном ролике. В качестве критерия расчета в обоих случаях выберем контактные напряжения между бандажом и опорным роликом. Для возможности проведения сравнительного анализа сначала перед началом обработки определим диапазон изменения напряжений на пятне контакта, связанный с отклонением от круглости профиля бандажа и погрешностями расположения опорного ролика.



### 3.2.1. Контактные проявления погрешностей формы и расположения перед восстановительной обработкой

Рассмотрим состояние пятна контакта между бандажом и роликом при следующих условиях: 1) ошибки расположения отсутствуют; 2) форма и размеры ролика номинальны, а бандаж имеет ошибки формы; 3) реакция между бандажом и роликом постоянна. Найдем закономерность изменения контактных напряжений в зависимости от формы поперечного сечения бандажа с номинальным радиусом  $R_H$  и радиусом опорного ролика  $R_L$ .

Постоянные контактные напряжения при контакте деталей номинальной формы по формуле Герца:

$$\sigma_H = B \cdot \sqrt{\frac{R_H + R_L}{R_L \cdot R_H}}, \quad (3.4)$$

где  $B$  – параметры, не связанные с формой поперечного сечения.

Контактные напряжения на участках с отклонениями от круглости бандажа при радиусе  $R_k$  кривизны его поверхности в точке контакта:

$$\sigma_{HR} = B \cdot \sqrt{\frac{R_k + R_L}{R_L \cdot R_k}} \quad (3.5)$$

Из (3.4) и (3.5) получаем:

$$\sigma_{HR} = \sigma_H \cdot K_{HR}. \quad (3.6)$$

Здесь  $K_{HR}$  – безразмерный коэффициент, демонстрирующий закономерность изменения контактных напряжений в зависимости от ошибок формы бандажа:

$$K_{HR} = \sqrt{\left(\frac{1 + R_L}{R_k}\right) / \left(\frac{1 + R_L}{R_H}\right)}$$

Для удобства анализа обозначим:  $k = R_L / R_H$  и  $i = R_H / R_k$ . Тогда:

$$K_{HR} = \sqrt{\frac{1 + k \cdot i}{1 + k}} \quad (3.7)$$

Из (3.6) и (3.7) следует, что контактные напряжения  $\sigma_{HR}$  будут переменны, если изменяется  $R_k$ . Изменение напряжений тем существеннее, чем больше разница между номинальным радиусом и радиусом кривизны. При этом  $K_{HR} \rightarrow \max$  и  $\sigma_{HR} \rightarrow \max$  при  $R_k \rightarrow \min$ .

Вместе с тем результаты расчетов  $K_{HR}$  для разных исходных данных позволяют сделать вывод о том, что изменение напряжений по величине не

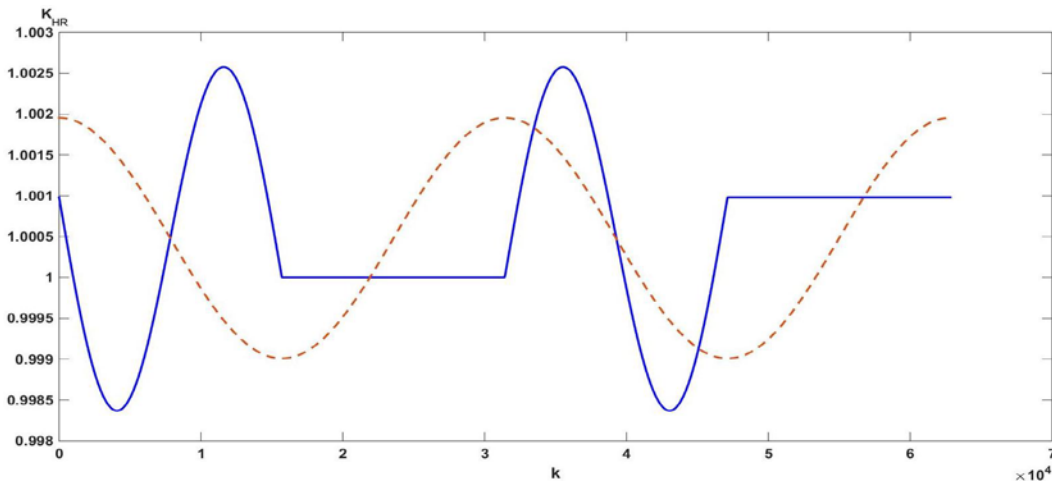


Рис. 3.8. Изменение коэффициента напряжений  $K_{HR}$  при моделировании движения бандажей при  $\Delta R=20$  мм с профилями *Cam* (сплошная) и *Cassini* (штриховая)

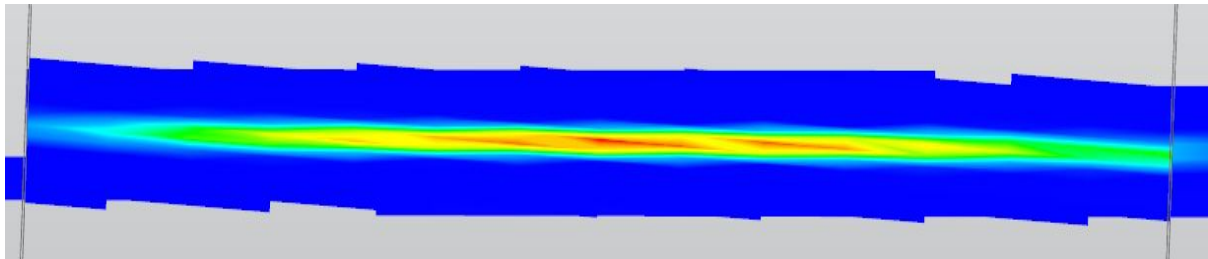


Рис. 3.9. Карта контактных давлений при повороте ролика на  $\gamma=3^\circ$  (площадь пятна контакта в 60,3 %, максимальное контактное напряжение  $\sigma_{Hmax}=422,52$  МПа)

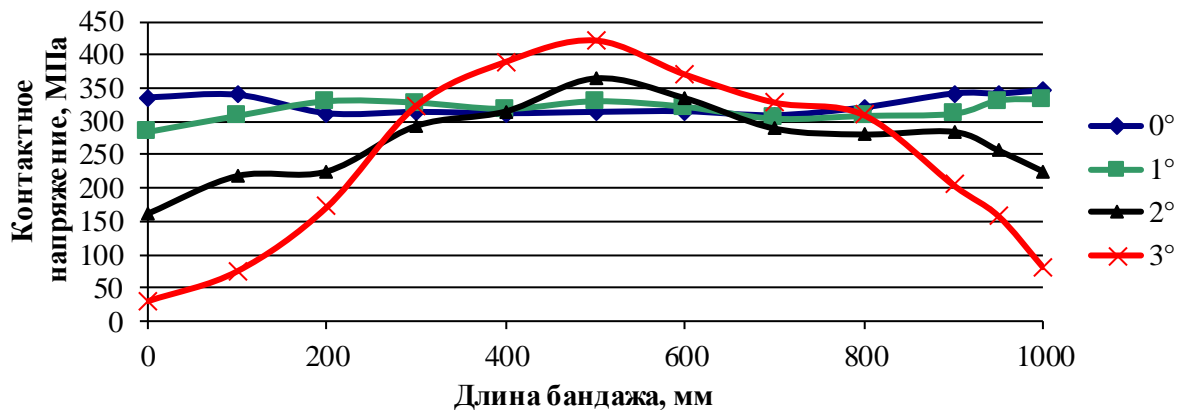


Рис. 3.10. Результаты моделирования распределения контактных напряжений по пятну контакта между бандажом и опорным роликом при различных углах  $\gamma$  и длине бандажа 1000 превышает 2%. Например, для профиля *Cam* при  $\Delta R=20$  мм коэффициент  $K_{HR}$  изменяется (рис. 3.8) от 0,998 до 1,002, т.е. изменение контактных напряжений  $\Delta\sigma_{HR}=0,5$  %. Еще меньшее значение  $\Delta\sigma_{HR}=0,4$  % получаем для профиля *Cassini* при  $\Delta R=20$  мм.

Из этого следует, что при моделировании контактного взаимодействия бандажа и ролика влиянием изменения контактных напряжений на поверхности бандажа, связанных с погрешностью формы, можно пренебречь.

Для каждой точки, расположенной на поверхности качения опорного ролика, погрешность формы бандажа изменяет вид цикла изменения напряжений, что может повлиять на малоцикловую усталость материала ролика. Наиболее существенно это влияние в том случае, если напряжения изменяются перманентно как, например, у профиля *Cassini* (рис. 3.8). Тогда частота, с которой каждая точка участвует в контакте с бандажом меньше частоты изменения напряжений и поэтому при каждом контакте возникают разные напряжения.

Для оценки влияния погрешностей расположения опорного ролика на распределение напряжений по пятну контакта используем модель контактного взаимодействия бандажа и ролика (см. п. 2.2.1).

Сначала рассмотрим погрешность расположения ролика, которая соответствует его повороту на угол  $\gamma$  вокруг оси  $O_3Z$ . Результаты расчетов (рис. 3.9 и 3.10) показывают: 1) длина пятна контакта при повороте осей от  $\gamma = 0$  до  $\gamma = 3^\circ$  не изменяется; 2) наименьшие напряжения возникают на концах контактной линии, а по ее длине изменяются не равномерно; 3) максимальные напряжения  $\sigma_{Hmax}$  возникают в центре поворота осей и на 25-30 % (при  $\gamma=3^\circ$ ) превышают напряжения при параллельных осях ( $\gamma=0$ ).

Поскольку при этом  $\sigma_{Hmax} \leq 549$  МПа, то условие сохранения контактной прочности поверхности качения бандажа (см. п. 2.2.2) выполняется.

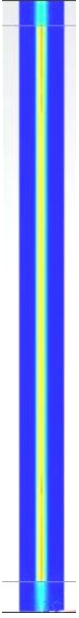
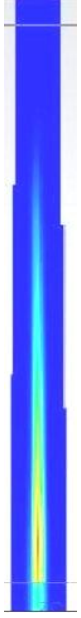
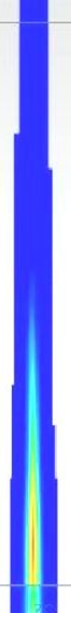


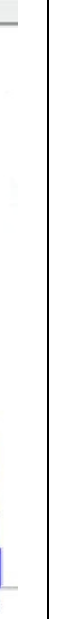
Проанализируем второй частный случай, при котором погрешность идентифицируется углом поворота  $\beta$  вокруг оси  $O_4Y$  опорного ролика (рис. 2.3).

Результаты расчетов (табл. 3.5) показывают: 1) длина пятна контакта, его форма и площадь существенно уменьшаются даже при незначительном повороте на доли градуса; 2) напряжения по длине ролика распределяются неравномерно; 3) для погрешностей положения ролика при повороте до  $\beta = 0,01$  град выполняется условие  $\sigma_{Hmax} \leq 549$  МПа; 4) при поворотах на углы от 0,01 до 0,1 град неизбежны

пластические деформации в глубине поверхностного слоя; 5) повороты на углы больше чем 0,1 град вызывают опасные для контактной прочности поверхности напряжения.

Таблица 3.5

**Моделирование изменения параметров пятна контакта при повороте опорного ролика на угол  $\beta$**

Площадь пятна контакта, %	100	88,4	79,4	65,85	47,76	17,86
Максимальное контактное напряжение на пятне, МПа	351,74	749,06	891,85	1005,65	1080,72	1257,52
Карта контактных давлений						
Угол $\beta$ в долях градуса	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,2

Таким образом, эти ошибки положения с одной стороны оказывают большее влияние на работоспособность конструкции, чем в первом рассмотренном случае, а с другой – являются меньшими по абсолютной величине (при  $\beta=0,004^\circ$  получим  $a_{yB}=0,063$  мм,  $a_{zB}=0,11$  мм,  $a_{xB}=0,0$  мм), что затрудняет их определение и устранение в практических условиях.

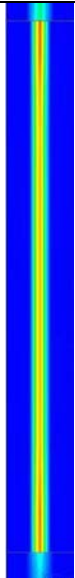
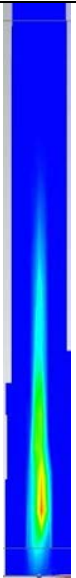
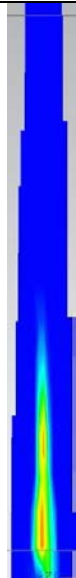
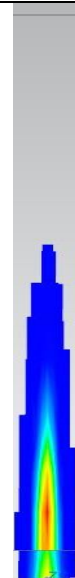


Рассмотрим результаты моделирования контакта бандажа и ролика при смещении опор регулировочными винтами. При построении модели сначала задаем перемещение  $s$  опоры  $B$  (рис. 2.4). Затем, определив погрешность положения ролика через углы  $\gamma$  и  $\beta$ , выполняем сборку бандажа и ролика.

Результаты расчетов (табл. 3.6) показывают: 1) любые перемещения от номинального положения опоры сопровождаются увеличением контактных напряжений и уменьшением площади пятна контакта; 2) при перемещении опоры

от 1 до 5 мм максимальные контактные напряжения соответствуют условию  $549 \text{ МПа} < \sigma_{\text{H}} < 1136 \text{ МПа}$ ; 3) перемещения одной опоры более чем на 5 мм вызывают

Таблица 3.6

**Моделирование изменения параметров пятна контакта при различных перемещениях одной опоры**

Изменение площади пятна контакта, %	100	90,43	61,14	39,02	34,72	29,12
Максимальное контактное напряжение, МПа	346,67	805,84	844	1097,15	1184,98	1205,68
Угол $\gamma$ в долях градуса	-	0,04	0,08	0,11	0,12	0,15
Угол $\beta$ в долях градуса	-	0,02	0,04	0,06	0,07	0,09
Угол $\lambda$ в долях градуса	-	0,02	0,055	0,088	0,12	0,15
Карта контактных напряжений						
Перемещение, мм	0	1	2,5	4	5,5	7

опасные для контактной прочности поверхности напряжения; 4) пятно контакта площадью менее 70% и концентрация на нем контактных напряжений расположены на противоположной смещаемой опоре кромке поверхности качения бандажа.

### 3.2.2. Контактные проявления процесса резания

Результаты расчетов демонстрируют, что в исходном положении (до обработки, см. строку  $L_t=0$  в табл. 3.7) контактные напряжения  $\sigma_{\text{H}}$  лишь на краях пятна контакта увеличиваются до максимального напряжения 347 МПа, а в остальной его части изменяются незначительно.

С началом обработки эта картина меняется (табл. 3.7). При глубине резания  $t=0,1$  мм в начале обработки (при  $L_t=100$  мм) контактные напряжения на участке 1 составляют только 27% от исходных  $\sigma_{Н1}$ . Это говорит о том, что в результате

Таблица 3.7

**Результаты моделирования изменения максимальных контактных напряжений (МПа) в точках пятна контакта при различном пути  $L_t$  резания с глубиной 0,4 мм**

$L_t$ , мм	Расстояния от начала пути резания (слева направо), мм											
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950	1000
0	336	340	312	314	312	314	315	309	321	342	342	347
100	0	0/433	396	381	359	342	337	337	339	339	369	388
200	0	0	0/498	475	396	382	371	375	373	361	413	404
300	0	0	0	0/566	564	482	431	424	423	413	455	482
400	0	0	0	0	0/610	604	525	481	473	495	497	551
500	18	15	10	5	0	0/686	686	650	585	551	570	606
600	74	77	74	64	35	15	5/798	723	700	702	644	740
700	113	127	132	116	107	100	82	79/806	766	759	627	629
800	166	183	195	176	168	173	150	83	35/871	814	789	817
900	213	235	245	226	228	233	221	214	123	1/954	1033	1117

Примечание: дробные значения в конце каждого пути резания связаны со скачкообразным изменением контактных напряжений. Первое значение соответствует напряжениям на участке 1, а второе – на участке 2.

резания между поверхностями контакта на участке 1 появляется зазор, который компенсируется упругой деформацией бандажа. С увеличением пути резания она увеличивается, и напряжения возрастают, но никогда не возвращаются к исходным  $\sigma_{Н1}$ . При  $t=0,2$  мм эта тенденция сохраняется (при  $L_t=100$  мм напряжения 6% от  $\sigma_{Н1}$ ) и зазоры отсутствуют.

На участке 2 контактные напряжения с увеличением пути резания возрастают. При этом они всегда максимальны в начале участка, затем монотонно уменьшаются и в конце участка снова возрастают (табл 3.7).

При завершении рабочего хода контактные напряжения всегда превышают допускаемые  $[\sigma_{Н}]$  (табл. 3.8). Например, при  $t=0,06$  мм и  $L_t=980$  мм максимальные контактные напряжения в зоне контакта  $\sigma_{Н}=1211$  МПа относятся к третьей группе опасности (см. п.2.2.2).

Так же установлено, что при обработке с глубиной резания больше 0,2 мм существует такой максимальный путь резания  $L_{t0}$ , при котором зазор присутствует на всем протяжении участка 1. Если для  $t=0,3$  мм это расстояние  $L_{t0}=200$  мм, для  $t=0,4$  мм –  $L_{t0}=400$  мм, для  $t=0,7$  мм – уже  $L_{t0}=700$  мм (табл. 3.8), то при  $t$  от 1 мм до 1,2 мм оно достигает  $L_{t0}=800$  мм.

Таблица 3.8

**Моделирование изменения максимальных контактных напряжений в точках пятна контакта при различном пути  $L_t$  резания с глубиной 0,7 мм**

Путь резания $L_t$ , мм	Максимальное контактное напряжение, МПа		Карта контактных напряжений
	Участок		
	1	2	
0	346,7		
100	0	425,2	
200	0	493,9	
300	0	570,9	
400	0	598,1	
500	0	694,8	
600	0	808,7	
700	0	895,1	
800	76	1039,4	
900	174	1419,7	
950	229	1691,5	
980	262	2947,9	

Соответственно уменьшается и путь резания  $L_{t\sigma}$ , при котором на участке 2 контактные напряжения превышают допусковые (рис. 3.11). Если при  $t=0,3$  мм

это происходит при пути резания  $L_{т\sigma}=950$  мм, для  $t=0,4$  мм он  $L_{т\sigma}= 920$  мм, для  $t=0,7$  мм уже  $L_{т\sigma}= 850$  мм, то при  $t$  от 1 мм до 1,2 мм не более  $L_{т\sigma}= 815$  мм.

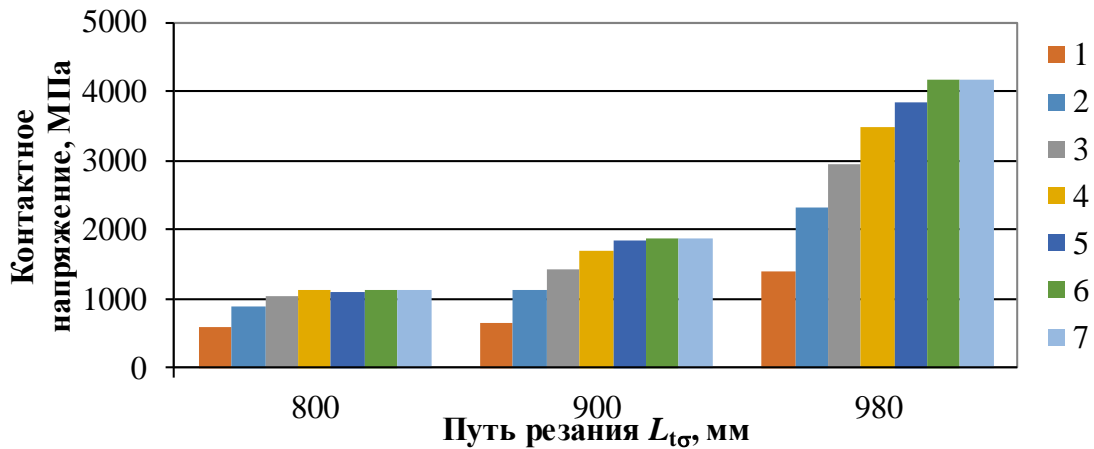


Рис. 3.11. Изменение максимальных контактных напряжений на пятне контакта бандажа при моделировании обработки с различной глубиной резания, мм: 1 – 0,1; 2 – 0,4; 3 – 0,7; 4 – 1; 5 – 1,2; 6 – 1,3; 7 – 1,4

Начиная от глубины резания  $t=1,3$  мм, зазор сохраняется на всем пути резания. При этом контактные напряжения на участке 2 уже не зависят от глубины резания и по отношению к исходным напряжениям  $\sigma_{нi}$  в зависимости от пути резания изменяются всегда одинаково (табл. 3.9). Причем максимальные контактные напряжения при пути резания больше  $L_{т\sigma}=250$  мм относятся ко второй, а при  $L_{т\sigma}\geq 800$  мм – к третьей группе опасности.

Таблица 3.9

**Отношение максимальных и исходных контактных напряжений в точках пятна контакта при моделировании обработки для глубин резания больше 1,2 мм при различном пути  $L_1$  резания**

$L_1$ , мм	Расстояния от начала пути резания (слева направо), мм										
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950	1000
100	1,28	1,28	1,22	1,15	1,08	1,07	1,09	1,05	1	1,08	1,12
200	0	1,62	1,52	1,26	1,22	1,18	1,21	1,16	1,06	1,20	1,17
300	0	0	1,65	1,83	1,59	1,29	1,39	1,32	1,21	1,33	1,39
400	0	0	0	1,91	1,92	1,82	1,69	1,53	1,45	1,44	1,63
500	0	0	0	0	2,16	2,19	2,09	1,83	1,61	1,68	1,75
600	0	0	0	0	0	2,53	2,41	2,36	2,18	1,96	2,20
700	0	0	0	0	0	0	2,88	2,69	2,41	1,98	1,93
800	0	0	0	0	0	0	0	3,48	3,00	2,98	3,17
900	0	0	0	0	0	0	0	0	4,13	4,82	5,43

Таким образом, с увеличением пути резания на участке 2 возникает опасный для контактной прочности многократный рост напряжений. С другой стороны,



такая тенденция доказывает то, что на участке 2 осуществляется перманентное базирование бандажа по поверхности ролика и, следовательно, при механической обработке сохраняется номинальное центрирование оси вращения корпуса вращающейся печи.

Кроме того, с увеличением пути резания растет неравномерность распределения нагрузки, которая действует только на сокращающемся участке 2. Одновременно изменяются реакции в опорах и их упругие деформации.

Поэтому для предупреждения повреждений поверхностей качения следует выполнять, по меньшей мере, два условия: 1) проводить обработку с малой глубиной резания (меньше 1 мм); 2) для завершения каждого пути резания выбирать такой способ обработки, который обеспечивает сохранение контактной прочности поверхности качения, как бандажа, так и ролика.

Для выполнения второго условия следует сначала (независимо от глубины резания  $t$ ) найти такой максимальный путь резания  $L_t$ , чтобы контактные напряжения на участке 2 относились в крайнем случае ко второй группе опасности. Тогда, если согласовать длину оставшегося участка с шириной абразивного инструмента, то его можно будет обработать врезным шлифованием без увеличения при этом контактных напряжений.

Возможность выполнения этой операции связана с глубиной резания. Например, при исходных данных конечно-элементной модели получено, что при  $t \leq 0,7$  мм длину  $L_x$  завершающего участка можно выбирать из диапазона от 50 до 100 мм. При  $t > 0,7$  мм должно выполняться условие  $L_x > 100$  мм, которое существенно ограничивает возможность практической реализации рассматриваемых технологических операций.

Если завершать обработку посередине ширины бандажа (рис. 3.12), тогда ценой уменьшения производительности (вследствие прерывистой двусторонней продольной подачи) можно (при  $L_x = 100$  мм и глубине резания не более 0,7 мм) на участке 2 уменьшить контактные напряжения (табл. 3.10), исключить возникновение кромочных повреждений и сохранить центрирование оси корпуса вращающейся печи. При обработке этого участка шлифованием контактные

напряжения на нем будут уменьшаться (а на соседних участках увеличиваться) в последовательности обратной их изменению при увеличении глубины резания (см. табл. 3.10).

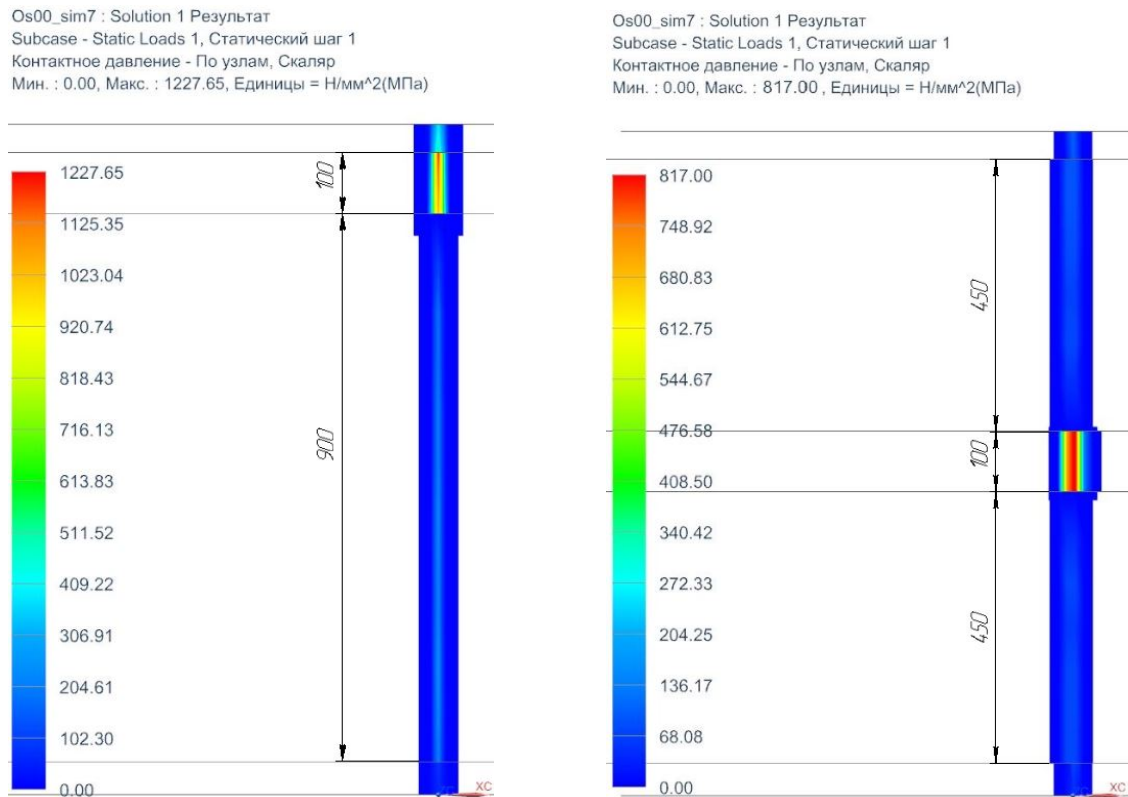


Рис. 3.12. Карты контактных напряжений при моделировании обработки бандажа (длина 1000 мм) с глубиной резания 0,5 мм и завершающим участком 100 мм, расположенным:  
а) в конце рабочего хода, б) посередине длины бандажа

Вместе с тем следует учитывать, что эти выводы основаны на предположении об абсолютно жестких опорах, бандаже и обечайке корпуса. В действительности упругие свойства этих деталей могут изменить картину переходного процесса при завершении технологической операции.

Поэтому рассмотрим подробнее окончание односторонней обработки (когда направление продольной подачи, например, слева направо не изменяется на протяжении всего рабочего хода). Тогда с уменьшением длины участка 2 увеличивается тенденция к повороту бандажа против часовой стрелки в вертикальной плоскости продольного сечения корпуса вращающейся печи.

При этом неравномерность распределения нагрузки по длине опорного ролика достигает максимума. Изменяются реакции в опорах оси, и даже при одинаковой их жесткости упругие деформации правой опоры будут больше, чем

левой. Ось ролика стремится к повороту по часовой стрелке, т. е. навстречу к поверхности бандажа. Это обеспечивает возможность изменения базирования бандажа, так как в контакт с роликом включается поверхность участка 1.

Поскольку эти упругие перемещения будут происходить в силовой плоскости  $ZO_2X$  (рис. 2.4 и 2.21), то положение бандажа и ролика будет зависеть

Таблица 3.10

**Изменение максимальных контактных напряжений (МПа) в точках пятна контакта при моделировании двухсторонней обработки с различной глубиной резания и длиной завершающего участка  $L_x=100$  мм**

$t$ , мм	Расстояния от начала пути резания (левого торца бандажа), мм											
	0	100	200	300	400	450	550	600	700	800	900	1000
0	336	340	312	314	312	314	314	315	309	321	342	347
0,1	116	127	117	90	2	353	353	21	147	132	138	138
0,3	97	98	95	109	68	585	585	68	109	97	109	110
0,5	67	70	69	66	42	816	816	44	71	64	80	82
0,7	45	43	39	25	17	1041	1041	18	28	32	49	52
0,8	29	29	22	11	8	1230	1230	8	12	16	32	34
0,9	12	8	2	0	0	1256	1256	0	0	1	13	15
1	0	0	0	0	0	1285	1285	0	0	0	0	0
1,2	0	0	0	0	0	1285	1285	0	0	0	0	0

от угла  $\beta$ . При упругих деформациях опор  $\beta$  изменяется (для рассматриваемых исходных данных) от 0,011 до 0,06 град [128]. Тогда если не учитывать деформацию корпуса печи, а считать, что ролик до нагружения контактирует с бандажом в двух точках, расположенных в начале участков 1 и 2 (рис. 2.15):

$$\beta = \arctg(t/L_t)$$









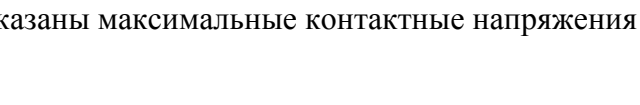
и при  $L_t=980$  мм и  $t=1$  мм получим близкий к максимальному угол поворота  $\beta=0,058$  град, а минимальный угол  $\beta=0,006$  град при  $L_t=980$  мм и  $t=0,1$  мм.

В остальных случаях, например, при  $L_t=980$  мм и  $t=1,2$  мм после поворота ролика на угол  $\beta=0,06$  град перед началом расчетов будем обеспечивать в модели контакт только на ребре бандажа в начале участка 2. Тогда взаимодействие поверхностей качения бандажа и ролика в других точках будет зависеть от упругих свойств их материалов, нагрузки и угла наклона  $\beta$ .

Результаты моделирования такого контакта бандажа и ролика демонстрируют существенные особенности распределения напряжений (табл. 3.11). При податливых опорах  $\beta \geq 0,01$  град и базирование бандажа происходит по

Таблица 3.11

**Моделирование изменения максимальных контактных напряжений в точках пятна контакта при обработке бандажа на податливой опоре при пути резания 980 мм**

Глубина резания, $t$ , мм	$\beta$	Максимальное контактное напряжение, МПа		Карта контактных напряжений
		Участок		
		1	2	
0,1	0,006	432,9 (315,9)	977,7 (1397,2)	
0,4	0,023	764,9 (291,6)	1013,4 (2321,4)	
0,6	0,035	822,1 (272,6)	534,5 (2757,2)	
0,8	0,047	837,7 (249,7)	188,5 (3122,3)	
1	0,058	1015,2 (224,8)	0 (3487,7)	
1,2	0,06	903,9 (200,3)	433,3 (3847,6)	
1,3	0,06	970,3 (187,4)	679,7 (4055,1)	
1,4	0,06	884 (175,3)	1202,2 (4204,2)	
1,6	0,06	876,7 (145,8)	1825,7 (4525,8)	
Примечание: в скобках для сравнения указаны максимальные контактные напряжения при жестких осях и опорах ( $\beta=0$ ).				

поверхностям обоих участков. Чем больше податливость оси и опор (больше угол  $\beta$ ), тем меньше контактные напряжения на участке 2 и больше на участке 1. Это способствует сохранению номинального центрирования бандажа. Неравномерность распределения напряжений по участку 1 сохраняется, но их

максимальные значения уже относятся ко второй группе опасности и это состояние при каждой глубине резания не изменяется до окончания прохода.

Увеличению угла  $\beta$  способствует изменение в процессе обработки реакций в опорах оси [128]. Тогда желательно, чтобы при завершении восстановительной обработки направления продольной подачи и осевого движения печи совпадали.

Вместе с тем рассмотренный эффект снижения контактных напряжений при податливой опоре проявляется при малой глубине резания (табл. 3.11). При  $t > 1,3$  мм и  $\beta = 0,06$  град (соответствует максимальной упругой деформации опоры) контактные напряжения на участке 2 хотя и намного меньше, чем при жестких опорах, но все-таки относятся к третьей группе опасности. Поэтому вероятность повреждения поверхности при окончании односторонней обработки сохраняется и при выборе такого режима требует, по крайней мере, пристального внимания и контроля состояния поверхности.

Еще одна особенность восстановительной обработки бандажей может быть связана с возможной погрешностью расположения ролика (п. 2.1.1). В качестве примера рассмотрим моделирование восстановительной обработки при смещении одного подшипникового узла опоры от номинального положения на 2,5 мм. Такое его положение может быть связано не только с погрешностями регулировки, но и с необходимостью обеспечения функционирования вращающейся печи (см. п. 1.1).

Тогда после начала обработки (табл. 3.12) со стороны расположения пятна контакта на участке 2 контактные напряжения увеличиваются, не выходя более 1% за пределы второй группы опасности. На середине пути резания образуется два пятна контакта с равнозначными напряжениями. С этого положения происходит перенос базирования бандажа на обработанную поверхность. Контактные напряжения на участке 1 возрастают, но до окончания обработки остаются в пределах второй группы опасности.

Эти результаты демонстрируют возможность использования регулировки положения опоры для уменьшения контактных напряжений и сохранения центрирования бандажа в процессе его восстановительной обработки.

Следует отметить, что изменение положения одной опоры влияет не только на работоспособность ее деталей, но и сказывается на функционировании остальных опорных узлов и привода печи. Поэтому такой способ обработки нельзя считать панацеей.

Более универсальным и предпочтительным следует признать способ

Таблица 3.12

**Моделирование изменения параметров пятна контакта при погрешности положения ролика 2,5 мм, глубине резания 1 мм и различном пути резания**

Путь резания $L$ , мм	Максимальное контактное напряжение, МПа		Площадь пятна контакта, %		Карта контактных напряжений
	Участок		Участок		
	1	2	1	2	
0	844		61,14		
50	0	1161,1	0	53,5	
100	0	1130,8	0	47,9	
300	446	1171,1	7,9	30,1	
500	790	873,8	14,3	29,3	
700	956,6	705	30,3	12,2	
900	1051,8	242	38,8	2,3	
950	1079,6	81,5	38,02	1,9	

обработки с центральным завершающим участком. Это связано с сохранением номинального центрирования бандажа, минимальными упругими деформациями обечайки, отсутствием влияния податливости опор и необходимости их регулировки перед началом обработки.

Вместе с тем, рассмотренные варианты напряженного состояния в поверхностном слое площадок качения, в первую очередь, опасны для материала опорного ролика. В точках его поверхности многократно (вплоть до окончания

обработки) при попадании на пятно контакта при пути резания  $L_{\text{тс}}$  возникают максимальные напряжения.

При обработке с неравномерным распределением припуска по поверхности катания бандажа эта закономерность соблюдается лишь при приближении к завершению всей технологической операции. На начальной стадии обработки вследствие локального удаления материала зазор между бандажом и роликом периодически появляется только на одной опоре. Это способствует сохранению центрирования корпуса печи за счет сохранения контакта базирующей поверхности со вторым роликом. Его резкое нарушение, вызывающее скачкообразное нагружение обечайки, возможно только в частном случае при такой погрешности формы бандажа, которая приводит к циклическому появлению зазоров на обеих опорах.

Кроме того, как было показано выше, восстановительная обработка изменяет базирующую поверхность бандажа, что в зависимости от особенностей конструкции переносного станка может влиять на формообразование.

### **3.3. Моделирование формообразования в процессе восстановительной обработки профиля бандажа**

#### **3.3.1. Влияние технологических баз на моделирование обработки бандажей переносными станками**

Рассмотренная выше (см. п. 2.3.3) кинематическая модель восстановительной обработки основана на геометрических связях системы бандаж-ролики-станок при изменении профиля за один оборот бандажа. С ее помощью можно рассматривать обработку бандажей переносными станками конструкции которых подобны станкам с ДСС, УВС-М и СПК.

Вместе с тем, как следует из предыдущего раздела п. 3.2, на геометрические связи этой модели оказывает влияние изменение в процессе обработки поверхности базирования. В зависимости от конструкции станка это по-разному сказывается на формообразовании профиля бандажа. Поэтому для уточнения алгоритма расчета кинематической модели необходим анализ закономерностей изменения базирования на каждом рабочем ходе.

Для станка УВС-М формообразование профиля зависит от базирования бандажа на опорных роликах. В начале пути резания оно происходит по исходному профилю бандажа. Поэтому на этом переходе образование зазоров при обработке не изменяет движение бандажа, а оно в свою очередь не влияет на формообразование до тех пор, пока не изменится поверхность базирования бандажа.

При отсутствии погрешности расположения опорных роликов это происходит в конце рабочего хода (см. п. 3.2.2), когда базирование (вследствие возрастания контактных напряжений) осуществляется уже по обработанному участку. В этом случае можно считать, что изменение профиля в течение одного оборота бандажа будет влиять на формообразование только на следующем рабочем ходе.

В станках с ДСС обработанная поверхность, как правило, является базирующей. На формообразование, в основном, оказывает влияние форма этой поверхности в виде своеобразной обратной связи, изменяющей положение ДСС и инструмента.

Существенным отличием СПК является то, что инструмент и копирный ролик на большей части рабочего хода располагаются в разных плоскостях (рис. 1.10). Поэтому в этих положениях обработка будет подобна УВС-М. Когда же инструмент и копирный ролик будут находиться в одной плоскости, то будут проявляться свойства обработки с ДСС. Получаемый при этом профиль будет отличаться от профилей на соседних обработанных на этом рабочем ходе участках.

Такого результата можно избежать (при условии модернизации конструкции), если в этом положении перенести базирование кронштейна на уже обработанные поверхности. При этом также исключается негативный эффект (вызывающий погрешности обработки) врезания инструмента на глубину резания при окончании каждого прохода, когда базирование копирного ролика под действием пружины переходит на обработанную поверхность.



Кроме того, для такой конструкции СПК подходит способ, рассмотренный в п. 3.2.2, двухсторонней обработки с центральным завершающим участком. Его профиль формируется при базировании копирных роликов по обработанной на этом рабочем ходе поверхности. В этом случае на станках СПК и УВС-М будут получаться подобные профили бандажа.

Таким образом, для оценки особенностей формообразования профилей бандажей достаточно рассмотреть следующие частные случаи обработки, связанные с влиянием различного базирования: 1) по одной и той же неизменяемой поверхности; 2) по профилю, полученному на предыдущем проходе (УВС-М и двухсторонняя обработка на СПК); 3) по изменяемой при резании поверхности (ДСС); 4) по разным поверхностям, сменяющим друг друга в зависимости от пути резания (односторонняя обработка на СПК).

С учетом этого в алгоритм расчетной модели (рис. 3.13) внесены изменения, позволяющие учитывать задаваемое в исходных данных базирование. Для этого, кроме радиус-вектора  $\rho = \rho(\varphi)$  (см. п. 2.3.1) исходного профиля введены в рассмотрение радиус-векторы  $\rho = \rho_1(\varphi)$  и  $\rho = \rho_2(\varphi)$ , изменяемые в той же полярной системе координат с полярным полюсом в т.  $O$  соответственно на текущем и предыдущем проходах. В начале расчета принимали, что:

$$\rho_1(\varphi) = \rho_2(\varphi) = \rho(\varphi).$$

Затем, при определении координат центра бандажа, в уравнения (2.28)...(2.30) подставляли радиус профиля, по которому задается соответствующее базирование  $\rho = \rho(\varphi)$ ,  $\rho = \rho_2(\varphi)$  или  $\rho = \rho_1(\varphi)$ . Далее при моделировании обработки в уравнения (2.37) подставляли только  $\rho = \rho_1(\varphi)$ , а в конце каждого прохода обновляли  $\rho_2(\varphi) = \rho_1(\varphi)$ . В процессе вычислений особенности базирования определяли в зависимости от конструкции переносного станка. Для станков с ДСС принимали  $R_1 = R_2 = r$  ( $r$  – радиус копирующего ролика),  $\rho_A = \rho_1(\varphi_1)$  и  $\rho_B = \rho_1(\varphi_1 + \psi_B)$ . А 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  $R_1 = R_2 = R$  ( $R$  – радиус опорного ролика) или при  $R_1 = R$ ,  $R_2 = r$  и двухсторонней обработке на СПК. В этих случаях считали, что во всех остальных сечениях бандажа при

увеличении пути резания будет получаться такой же профиль, как и в плоскости

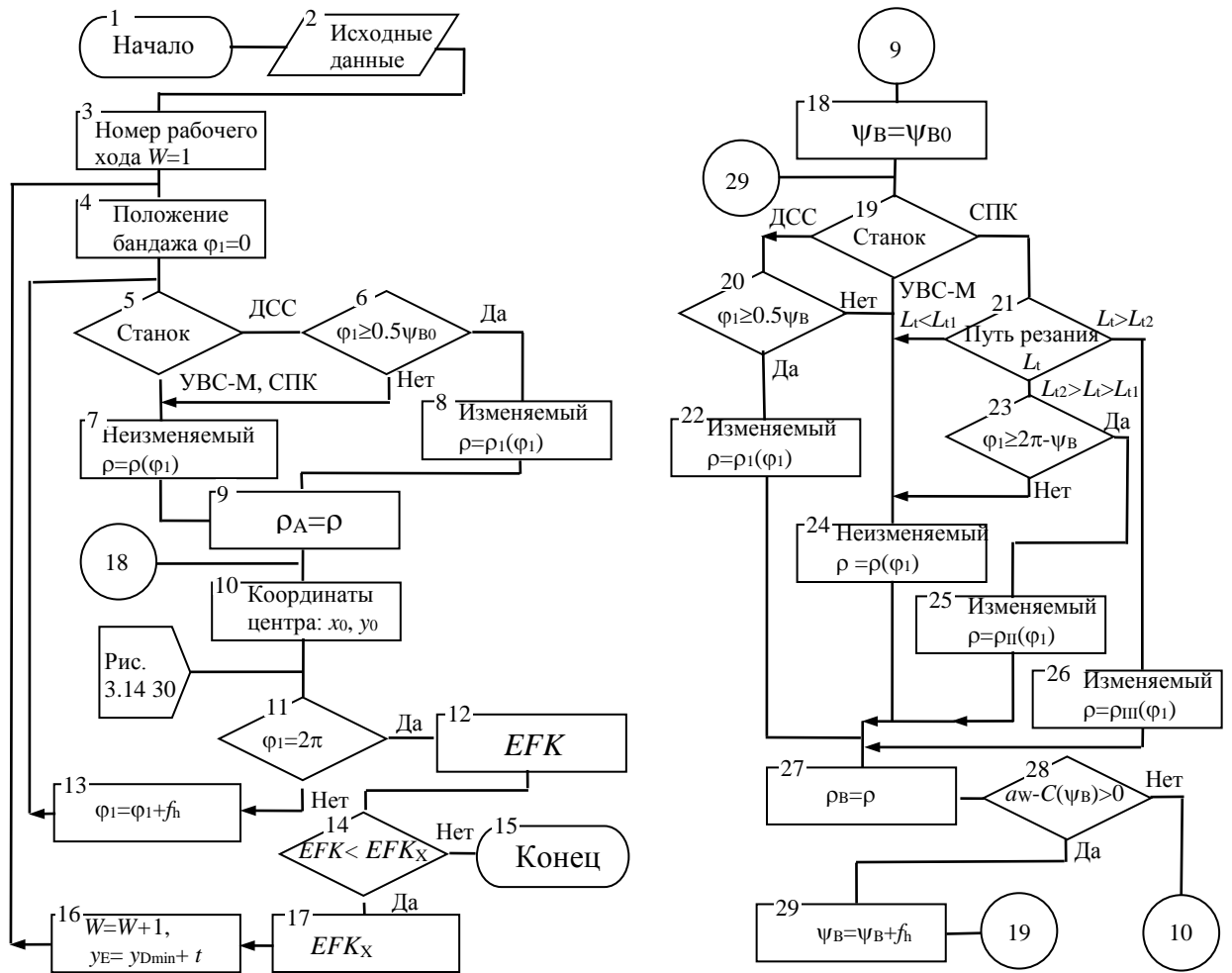


Рис. 3.13. Блок-схема алгоритма расчета формообразования профиля бандажа при его восстановительной обработке переносными станками:  $\psi_{В0}$  – центральный угол при номинальном профиле бандажа;  $L_{11}$  и  $L_{12}$  – составляющие пути резания при  $L_{12} = B - L_{11}$ , где  $B$  – длина копирующего ролика;  $C(\psi_{В})$  – вычисляемое расстояние  $O_1O_2$ ;  $EFK_x$  – минимальное отклонение от круглости

расчетной модели, связанной с поперечным сечением и проходящей через точки  $O_1$ ,  $O$  и  $O_2$  (рис. 2.19). Поэтому в конце каждого рабочего хода обновляли  $\rho_2(\varphi) = \rho_1(\varphi)$  при  $\varphi = 0 \dots 2\pi$ . 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 профиль  $\rho_I(\varphi)$ ,  $\rho_{II}(\varphi)$ ,  $\rho_{III}(\varphi)$  в трех поперечных сечениях соответственно: в начале при  $\rho_B = \rho_2(\varphi_1 + \psi_B)$ , в середине (при расположении инструмента и копирующего ролика в одной плоскости) 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  $\varphi = 0 \dots 2\pi$ .



*Motion.m* (п. 2.3.1), используя анализ движения бандажа на роликах и индикаторной диаграммы, выбираем режим обработки. И затем в третьей программе *Working.m* [94] (приложение 3, П. 3.4) моделируем операцию снятия заданного припуска. Очевидно, что вторую и третью программы можно использовать в обратном порядке (например, при необходимости анализа одного из полученных при обработке профилей). Совместимость всех программ обеспечивается средой *MATLAB* (©) при использовании одинаковых переменных, размерности массивов в сохраняемых файлах данных и имен последних.

### 3.3.2. Последовательность моделирования и визуализации результатов

Моделирование процесса восстановительной неуправляемой обработки поверхности качения бандажа выполняли с целью определения минимизирующих отклонение от круглости профиля бандажа режимов резания с учетом влияния этого процесса на функционирование вращающейся печи.

Для этого использовали модель восстановительной обработки бандажа (п. 2.3.3 и п. 3.3.1), выполняя вычисления на протяжении как одного его оборота, так и в целом для всех проходов, которые требовались для исправления погрешности формы при заданной поверхности базирования.

Перед началом вычислений подготавливали следующие исходные данные: 1) полярные координаты исходного профиля (*Cam*, *Camomile*, *Cassinini* или *Corner*) бандажа определяли при  $R_H=2425$  мм,  $\Delta R=2$  мм в программе *Forma.m* (п. 2.1.2) и сохраняли в файле данных, название которого *FormCam.mat*, *FormCamomile.mat*, *FormCassini.mat* или *FormCorner.mat* связано с названием исходного профиля (п. 2.1.2); 2) радиус опорного ролика  $R=750$  мм, межосевое расстояние ролик-опор  $a_w = 3175$  мм; 3) длины хорд, связывающих точки контакта бандажа с роликами, одинаковы ( $L=2425$  мм); 4) задавали один из четырех случаев базирования (п. 3.3.1); 5) начальное положение инструмента, т.е. координату  $y_E$  вершины режущей кромки инструмента определяли в программе *Motion.m* (см. п. 2.3.1) после загрузки в нее полярных координат исходного профиля из соответствующего файла данных (например, для профиля *Cam* файл *FormCam.mat*).

Моделирование восстановительной обработки проводилось в следующей последовательности. Прежде всего, отдельно для каждого исходного профиля и случая базирования, задавая глубину резания  $t$  (в диапазоне от 0,05 до 2 мм с шагом 0,1 мм) и изменяя число проходов  $W$ , вычисляли отклонение от круглости  $EFK$  по ГОСТ Р 53442-2009 (п. 2.3.1) и строили функцию:

$$f_1 = EFK(t, W) \quad (3.8)$$

Затем определяли минимум  $f_{1\min}$  этой функции и использовали его для построения закономерности:

$$f_{1\min} = f_{1\min}(t_i, W_i), \quad (3.9)$$

которая представляет тенденцию наилучшего исправления погрешности формы заданного исходного профиля в зависимости от принятого базирования и глубины резания.

Производительность каждого режима оценивалась получаемым при нем числом проходов, а для определения влияния технологических баз на результат обработки каждого исходного профиля помимо непосредственного сравнения результатов считали, что эффективность исправления погрешности формы бандажа каждым станком (СПК, СПК/УВС-М или ДСС) тем выше, чем больше вариация минимального отклонения от круглости на всем диапазоне глубины резания функции (3.9).

Количественно этот критерий оценивали коэффициентом эффективности:

$$k = \frac{S}{EFK_0}, \quad (3.10)$$

где

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [f_{1\min}(t_i, W_i) - EFK_0]^2}{n}}, \quad (3.11)$$

$EFK_0$  - исходное (перед началом обработки каждого профиля) отклонение от круглости;  $t_i$  - глубина резания из ряда  $t_i = 0,1 \cdot i$  мм, при  $i = 1 \dots n$ , где  $n$  - число значений ( $n = 20$ ). Это выражение справедливо при выполнении условия:

$$[f_{1\min}(t_i, W_i) - EFK_0] < 0.$$

При

$$[f_{1\min}(t_i, W_i) - \text{EFK}_0] > 0,$$

то есть если обработка увеличивает погрешность формы бандажа, в (3.11) подставляли  $f_{1\min}(t_i, W_i) = \text{EFK}_0$ .

Кроме режимов с постоянной глубиной резания на всех проходах, были рассмотрены возможности исправления погрешности формы при обработке бандажей станком с ДСС при разной глубине резания на каждом проходе. Для этого сначала для каждого исходного профиля задавая глубину резания  $t_1$  (в диапазоне от 0,5 до 1,5 мм с шагом 0,1 мм), на первом проходе вычисляли отклонение от круглости в конце второго прохода при глубине резания  $t_2$  (в диапазоне от 0,05 до 0,5 мм с шагом 0,05 мм), как функцию двух переменных:

$$f_2 = \text{EFK}(t_1, t_2) \quad (3.12)$$

Затем, выполняя анализ этой функции, или определяли ее глобальный минимум, или аппроксимировали зону локальных минимумов алгебраическим уравнением.

Для выполнения сравнительного анализа полученные при моделировании параметры режимов резания, минимизирующих отклонение от круглости профиля бандажа, собраны в таблицу 3.13.

В нее, прежде всего, помещали глубину резания и число проходов, при которых в каждом из рассмотренных случаев достигается глобальный минимум функции (3.9). Как правило, это получается при большом числе проходов ( $W \geq 18$ ), что неприемлемо для практики ввиду низкой производительности такой обработки. Поэтому в таблицу 3.13 добавлены режимы при числе проходов  $W=1$  и  $W=2$ , а для станка с ДСС параметры  $(t_1, t_2)$  обработки с разной глубиной резания на каждом из двух проходов, обеспечивающие глобальный минимум соответствующей исходному профилю функции (3.12).

Поскольку коэффициент эффективности  $k$  является интегральным показателем, то его в таблицу не включали, а использовали только для сравнения влияния технологических баз на результат обработки.

Для анализа трансформации профиля в процессе моделирования восстановительной обработки бандажей строили индикаторные диаграммы  $y_E=f(\varphi_1)$  и круглограммы, на которых изменение полярного радиуса  $\rho_W(\varphi)$  на

Таблица 3.13

**Результаты моделирования восстановительной неуправляемой обработки бандажей вращающихся печей**

Профиль	Отклонение от круглости по ГОСТ Р 53442-2009, мм	Глубина резания, мм	Число рабочих ходов	Координаты т. F центра концентрических окружностей, мм		Перемещения центра (т. O) корпуса печи, мм		Радиальное биение бандажа, мм
				$x_F$	$y_F$	по гориз	по верт	
Cam	$EFK_0=1,33$	–	–	-1,8	1,8	7,6	4,6	1,78
	0,38/0,28	0,05	18/20	-1,7	1,7	5,1/5,1	5,1/5,1	0,28
	0,44/0,73/0,43	1,4/1/1,5	1	-1,7/-1,8/-1,7	1,7	5,4/5,9/5,2	5,1/5,07/5,1	0/0,71/0,69
	0,44/0,61/0,35	0,7/0,5/0,7	2	-1,7	1,7	5,4/6,2/6,8	5,1/4,9/4,7	0/0,59/0,54
	0,47	0,7; 0,3	2	-1,7	1,7	6,1	4,8	0,5
Cassini	$EFK_0=2$	–	–	0	0	3,6	1,2	0,85
	0,25/0,3	0,02	21/24	0,1	0,1/0	0,9/0,6	0,5/0,4	0,34/0,4
	1,19/1,21/1,2	0,9/0,9/1,6	1	0	0,2/0	2,2/2,5/2,2	0,7/1,1/0,8	0/1,15/0,62
	1,19/0,94/0,9	0,6/0,4/0,7	2	0/0/0,1	0/0,2/0	2,1/3,2/2,3	0,7/1,3/1	0/0,88/0,61
	0,74	0,6; 0,05	2	0	0,2	2,5	1	0,63
Corner	$EFK_0=2$	–	–	1	0	4,1	3,4	2,38
	0,66/0,61	0,05	22/23	1	0,1/0	2,5/2,5	2,4/2,5	0,4/0,43
	1,69/1,53/1,67	1,4/1,3/3,6	1	1	0	3,3/3,8/3,2	3,3/2,7/3,2	0/1,16/0
	1,69/1,31/0,95	1,1/0,7/1,6	2	1/1/1,1	0/0/0	3,3/4,1/3,3	3/3,1/3	0,2/0,9/0,88
	1,16	1,2; 0,4	2	1	0,1	3,6	2,8	1,11
Camomile	$EFK_0=2$	–	–	0	0	3,9	1,5	3,52
	0,58/0,42	0,31/0,7	5/3	0	0	1,2/2,1	0,8/0,7	0,51/0,55
	0,76/1,5/0,98	2/1,7/1,7	1	0	0	2,3/1,5/1,7	0,7/0,8/0,6	1,5/1,3/1,3
	0,76/0,7/0,37	1/0,9/1	2	0/0,2/0	0/1/0	1,5/2,2/3,1	0,5/1,6/1,1	1,5/0,98/0,5
	0,54	1,5; 0,1	2	0	0	1,4	1	0,5

Примечание. 1) В первой строке для каждого профиля указаны его исходные параметры. 2) В строках со второй по четвертую (включительно) перед наклонной чертой (справа налево) указаны результаты обработки для ДСС, затем для станка УВС-М и, наконец, для СПК. 3) В последней строке для каждого профиля указаны результаты обработки с разной глубиной резания на каждом рабочем ходе станком с ДСС.

каждом рабочем ходе с номером  $W$  представляли в виде кривой:

$$\mu_W(\varphi) = \rho_W(\varphi) - R_{const},$$

где  $\varphi$  – полярный угол,  $R_{const}$  – постоянный радиус (определяет масштаб круглограммы). Кроме того, из индикаторных диаграмм  $y_{EW}=f_W(\varphi_1)$ , получаемых за одну операцию, определяли припуски на обработку  $z_W$  и  $z_\lambda$  (см. ниже) и

радиальное биение  $ECR$  (п. 3.1.1) профиля с минимальным за всю операцию отклонением от круглости (табл. 3.13).

### 3.3.3. Особенности формообразования при базировании по неизменяемой поверхности

Обязательным условием восстановительной обработки бандажей при базировании по неизменяемой поверхности является наличие зазора между обработанной поверхностью бандажа и поверхностями базирования. В полной мере этому условию соответствует двухсторонняя обработка с центральным завершающим участком и равномерном распределении припуска на СПК, которая была принята за основу для моделирования.

В процессе моделирования базирование копирного ролика не изменялось до полного окончания обработки на соседних участках. На этом основании считалось, что на каждом из них независимо от пути резания получаются

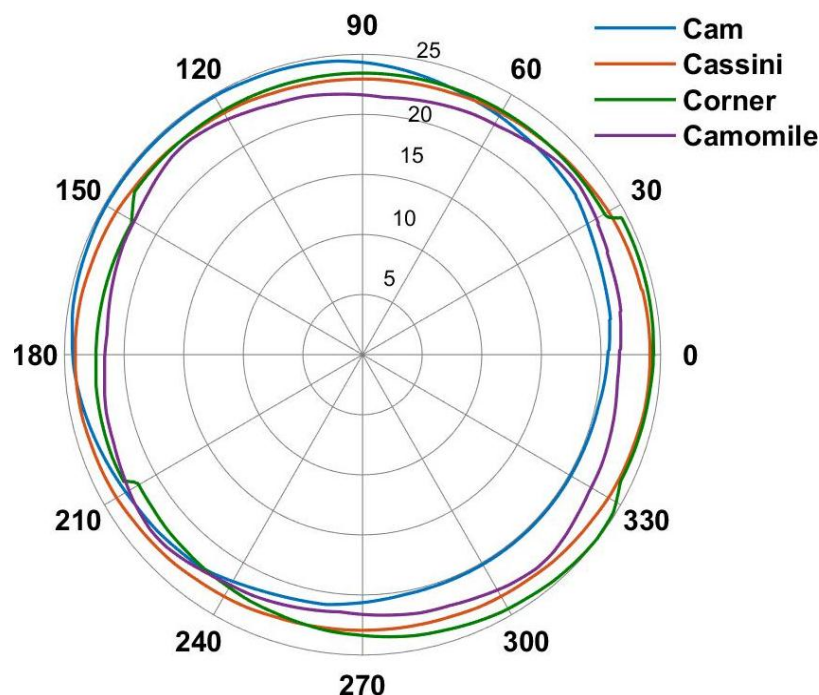


Рис. 3.15. Перманентные формы рациональных (при  $EFK=EFK_x$ ) профилей, получаемых при моделировании обработки с базированием по неизменяемой поверхности и следующих исходных данных: *Cam* ( $t=1,4$  мм;  $W=1$ ); *Cassini* ( $t=0,9$  мм;  $W=1$ ); *Corner* ( $t=1,4$  мм;  $W=2$ ); *Camomile* ( $t=3,5$  мм;  $W=1$ );  $R_{const}=2400$  мм

одинаковые профили. Поэтому при расчетах на каждом проходе рассматривали формообразование только за один оборот бандажа.



При этом установлено, что для каждого исходного профиля есть такая глубина резания  $t_x$ , начиная с которой при  $t \geq t_x$  независимо от числа рабочих ходов  $W$  в поперечном сечении всегда образуется профиль с одним и тем же отклонением от круглости  $EFK_x$  (рис. 3.15). Для исходных профилей *Cam*, *Cassini*, *Camomile* и *Corner* при одном рабочем ходе ( $W=1$ ) получены соответственно  $t_x=1,4; 0,9; 3,5; 1,4$  мм и также  $EFK_x=0,44; 1,19; 1,5; 1,7$  мм.

Такой результат объясняется тем, что форма получаемого при обработке профиля зависит от формы базирующей поверхности. Так как эта поверхность не изменяется, то и траектория инструмента относительно бандажа всегда остается неизменной. Поэтому при обработке с разной глубиной резания получаются геометрически подобные профили (рис. 3.16; приложение 2, рис. П.2, П.4 и П.6), которые ограничены эквидистантными концентрически расположенными замкнутыми кривыми с одним и тем же минимальным отклонением от круглости  $EFK_x$ .

Улучшить это  $EFK_x$  выбором параметров обработки невозможно. Поэтому для каждого исходного профиля определяли только глубину резания, необходимую для достижения  $EFK_x$  за один или два рабочих хода. Для профилей *Cam* и *Corner* это условие при  $W=1$  выполняется при  $t \geq 1,4$  мм, для *Cassini* при  $t \geq 0,9$  мм, а для *Camomile* при  $t \geq 3,5$  мм.

За два рабочих хода для профилей *Cam*, *Cassini*, *Camomile* и *Corner* минимальное отклонение от круглости  $EFK_x$  получается при глубине резания, выбираемой из диапазона соответственно:

$$1,4 > t \geq 0,7 \text{ мм}, 0,9 > t \geq 0,5 \text{ мм}, 3,5 > t \geq 1,8 \text{ мм и } 1,4 > t \geq 1,1 \text{ мм}.$$

Для профилей *Cam*, *Cassini* и *Corner*  $EFK_x$  является глобальным минимумом функции (3.8), к которому отклонение от круглости  $EFK$  при увеличении глубины резания приближается сверху. Только для профиля *Cam* при достижении  $EFK_x$  получается существенное исправление погрешности формы на 67%, тогда как для профилей *Cassini* и *Corner* соответственно только на 40% и 14%.

При обработке профиля *Samomile*  $EFK_x$  является локальным минимумом,

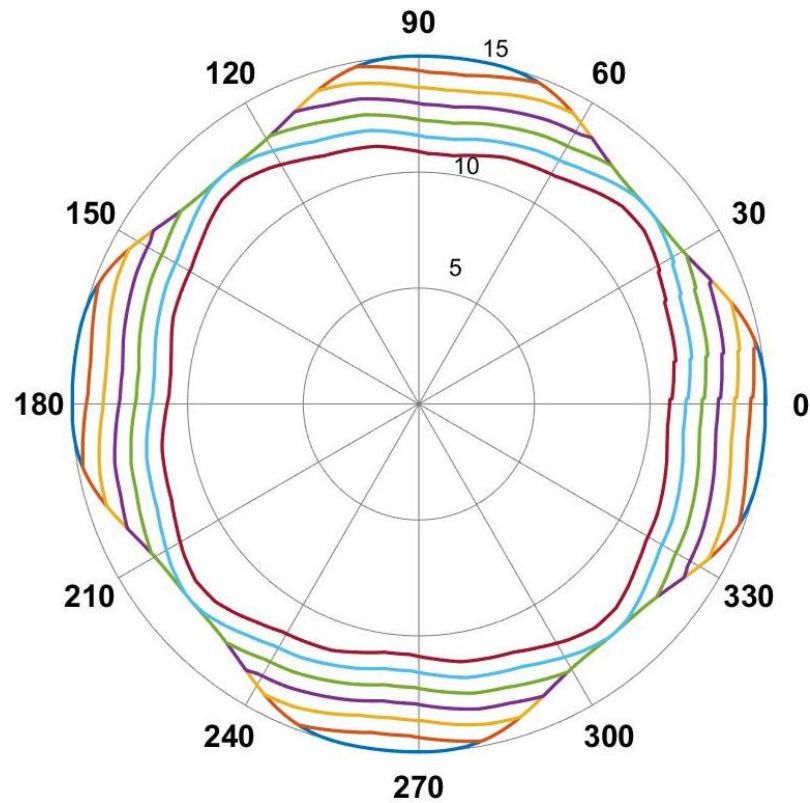


Рис. 3.16. Изменение профиля *Samomile* ( $R_{const}=2410$  мм) при моделировании восстановительной обработки с базированием по неизменяемой поверхности (СПК) и  $t=0,7$

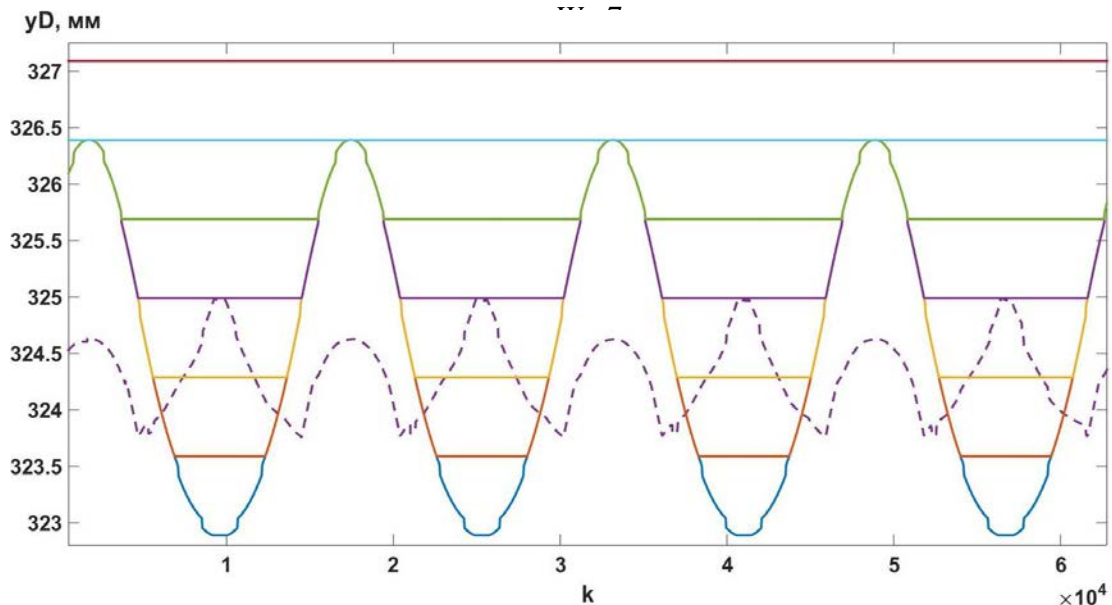


Рис. 3.17. Изменение индикаторной диаграммы при моделировании обработки профиля *Samomile* ( $W=7$ ,  $t=0,7$  мм) с базированием по неизменяемой поверхности: сплошные линии – диаграммы, полученные на соответствующем рабочем ходе; штриховой линией обозначена полученная в программе *Motion* диаграмма профиля (для  $W=4$ ) с минимальным  $EFK=0,81$  мм

при котором выполняется исправление погрешности формы на 25% (рис. 3.16).

Глобальный минимум  $EFK=0,76$  мм получается при  $t=1$  мм за  $W=2$  или при  $t=2$  мм за  $W=1$ . Тогда происходит исправление погрешности формы на 62%.

Из этих результатов следует, что профиль с  $EFK_x$  наибольшего габарита представляет собой кривую вписанную в исходный профиль и имеющую с ним в некоторых точках одинаковые радиусы. Для получения такого профиля припуск на обработку должен быть равным радиальному биению  $ECR$ .

В процессе моделирования обработки после достижения  $EFK_x$  индикатор оставался неподвижным и на индикаторной диаграмме для всех профилей получались прямые линии (рис. 3.17, приложение 2 рис. П.3, П.5 и П.7). Это связано с тем, что базирование копирного ролика происходило по-прежнему по поверхности исходного профиля с погрешностью формы. Поэтому после окончания обработки для получения информации о движении бандажа с результирующим профилем (для которого  $EFK=EFK_x$ ) на опорных роликах использовали программу *Motion.m* (п. 2.3.1). После загрузки в нее полярных координат этого профиля вычисляли девиации центра корпуса вращающейся печи и строили индикаторную диаграмму (табл. 3.13 и рис. 3.17 и приложение 2 рис. П.3).

Результаты расчетов показывают, что для всех исходных профилей радиальное биение  $ECR$  после завершения обработки уменьшается, но не устраняется полностью. Наиболее существенно (на 59%)  $ECR$  снижается после обработки профиля *Cam*. Для профилей *Camomile* и *Corner* изменение  $ECR$  составляет 41%, а для профиля *Cassini* 36%.

Радиальные биения связаны с плоскопараллельным движением бандажа на опорных роликах. После окончания обработки это движение сохраняется для всех исходных профилей. Например, после обработки профиля *Cam* его геометрический центр т. *O* будет перемещаться по траектории, габариты которой составляют по горизонтали 5,4 мм, а по вертикали 5,1 мм. Так как через т. *O* проходит продольная ось симметрии корпуса вращающейся печи, то значит над опорой с этим бандажом корпус будет совершать по вертикали и горизонтали такие же перемещения.

Следовательно, исправление погрешности формы бандажа при базировании по неизменяемой поверхности только уменьшает связанные с ней негативные перманентные перемещения корпуса вращающейся печи. Для профилей *Cam* и *Corner* перемещения т. *O* по вертикали и горизонтали сокращаются в среднем в 1,1 раза, а для *Camomile* и *Cassini* соответственно в 1,9 и 1,7 раза. При этом для профилей *Cam* и *Corner* перемещения оси корпуса по-прежнему превышают допускаемые.

Таким образом, при двухсторонней обработке с центральным завершающим участком станком СПК влияние на величину исправления погрешности формы профиля бандажа выбором режимов резания ограничено погрешностью формы поверхности базирования и поэтому возможно только в узком диапазоне глубины резания. Для получения лучших результатов обработки она должна выполняться таким образом, чтобы базирование осуществлялось по улучшаемой на каждом проходе поверхности.

### **3.3.4. Выбор параметров обработки бандажей при базировании по изменяемой поверхности**

Базирование по изменяемой при обработке поверхности непосредственно реализуется в станках с ДСС и проявляется при односторонней обработке на СПК. Моделирование обработки для этих случаев выполнялось отдельно, но на одной модели, дополненной условиями, рассмотренными в п. 3.3.1.

В процессе расчетов было установлено, что для каждого из рассматриваемых станков и исходных профилей для любой глубины резания  $t_i$  существует только одно минимальное отклонение от круглости  $f_{1\min}$ , достигаемое при определенном числе рабочих ходов  $W_i$ .

Для большинства исходных профилей лучшее исправление формы достигается при обработке с крайне малой глубиной резания (0,02...0,05 мм) при большом числе рабочих ходов (18...22).

Это объясняется тем, что, судя по индикаторным диаграммам  $y_E = f(\varphi_1)$  (рис. 3.19; приложение 2 рис. П.9, П.11 и П.13) в процессе исправления формы сначала последовательно удаляется только материал той поверхности, которая вызывает

биения. При этом есть возможность, как только функция  $y_E=f(\varphi_1)$  трансформируется в прямую  $y_E=\lambda$ , а профиль, соответственно, в окружность,

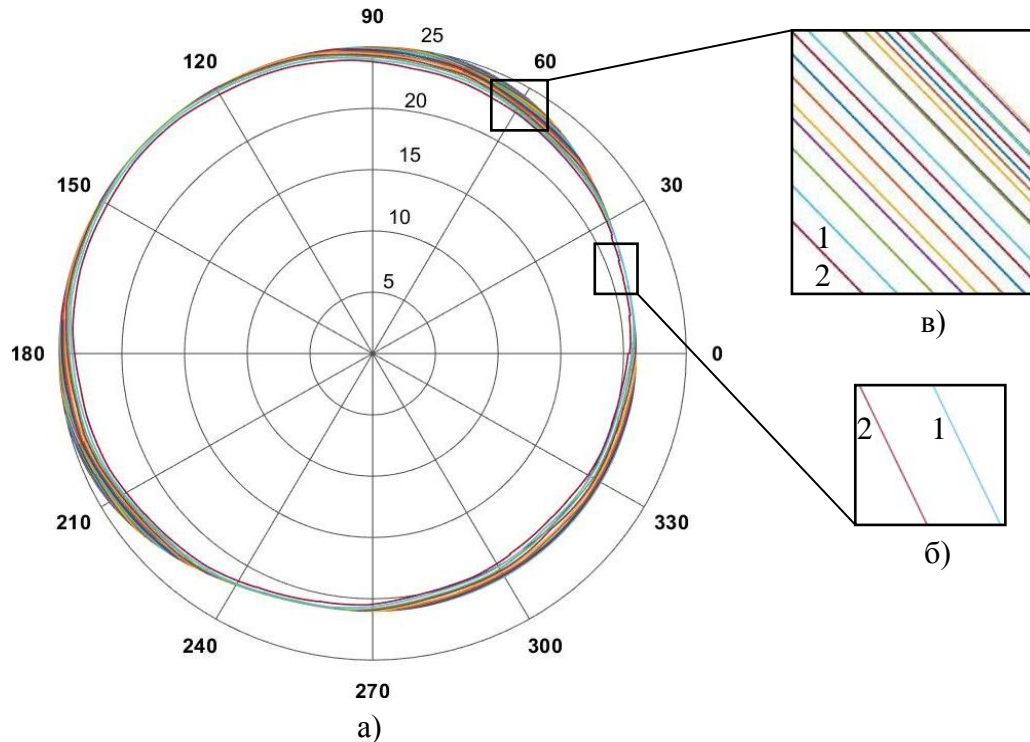


Рис. 3.18. Результаты моделирования механической обработки станками УВС-М и СПК: а – изменение профиля *Cam* (при  $W=21$ ,  $t=0,05$  мм,  $R_{const}=2410$  мм); б и в – кривые профиля *Cam* при  $R_{const}=0$  мм и рабочих ходах  $W=20$  и  $W=21$  соответственно 1 и 2

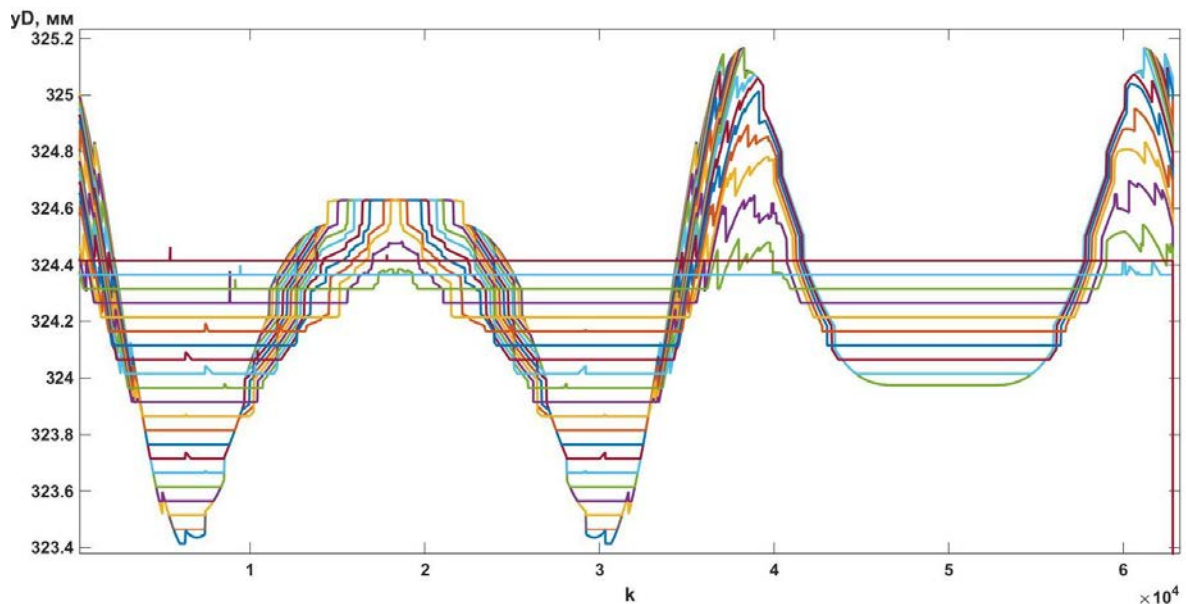


Рис. 3.19. Изменение индикаторной диаграммы при моделировании обработки профиля *Cam* ( $W=21$ ,  $t=0,05$  мм) с базированием по поверхности, полученной на предыдущем проходе (УВС-М и СПК)

прекратить обработку. Эта окружность является (при рассмотренных исходных данных) наилучшим решением задачи минимизации отклонения от круглости

профиля бандажа. На круглограммах она представляет собой вписанную в исходный профиль окружность (кривая 1 на рис. 3.18; приложение 2 рис. П.8, П.10 и П.12) с несколькими точками его касания (две для *Cassini* (приложение 2 рис. П.8) и *Corner* (приложение 2 рис. П.10), три для *Cam* (рис. 3.18) и четыре для *Camomile* (приложение 2 рис. П.12)). Будем называть ее вписанной рациональной (относительно исправления погрешности формы) окружностью (ВРО).

Разница между переменным полярным радиусом каждого исходного профиля и радиусом ВРО определяет величину общего припуска (при отсутствии системы управления положением инструмента). Текущий припуск на проходе с номером  $W$  определяется как

$$z_W = (y_{EWmin} - y_{Emin}),$$

где  $y_{EWmin}$  – минимум функции  $y_{EW} = f_W(\varphi_1)$  на этом проходе, а  $y_{Emin}$  глобальный минимум индикаторной диаграммы за всю операцию.

Припуск на обработку каждого профиля до ВРО:

$$z_\lambda = (\lambda - y_{Emin}),$$

где  $\lambda$  определяется расчетом по предложенной модели и соответствует показанию индикатора при контакте с поверхностью ВРО. Поэтому при базировании по изменяемой поверхности для исправления погрешности формы бандажей должно выполняться условие:

$$\sum_{i=1}^{W_s} t_i \leq (\lambda - y_{Emin}), \quad (3.13)$$

где  $t_i$  - глубина резания на проходе с номером  $i$ ,  $W_s$  - число проходов за операцию.

После достижения ВРО при увеличении числа проходов с этой же глубиной резания  $EFK$  увеличивается (рис. 3.20). Например, при использовании ДСС для профиля *Cassini*, чтобы получить профиль с  $EFK_{21} = 0,25$  мм, требуется выполнить 21 проход с глубиной 0,02 мм. При продолжении обработки получаем  $EFK_{22} = 0,39$ ,  $EFK_{23} = 0,47$  мм и т.д.

Эта закономерность выполняется и при обработке всех исходных профилей для случая базирования по поверхности, полученной на предыдущем проходе (станки УВС-М и СПК). Из этого следует, что исходная погрешность формы

бандажа не связана с причиной увеличения отклонения от круглости после достижения ВРО. Поэтому для исключения влияния формы исходного профиля на формообразование проанализируем точение станком с ДСС профиля *Const* с постоянным радиусом 2425 мм.

Результаты расчета (рис. 3.21) демонстрируют, что при первом проходе

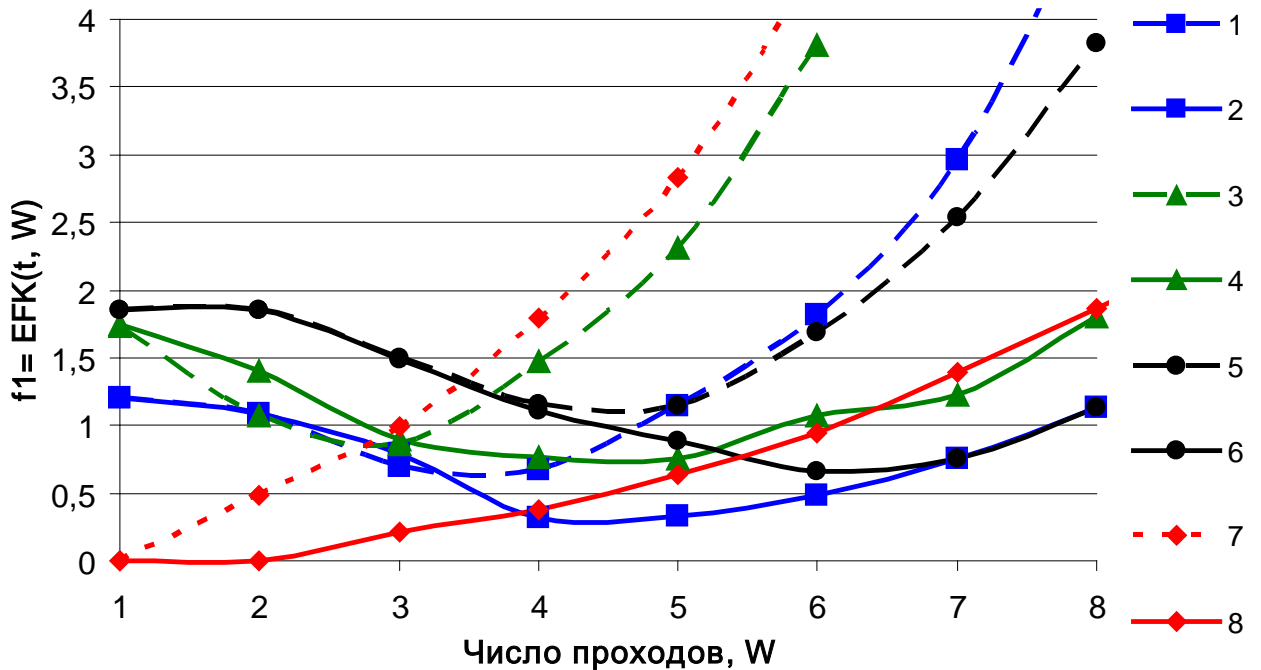


Рис. 3.20. Изменение отклонения от круглости при глубине резания  $t=0,3$  мм для разных исходных профилей бандажей:

1, 2 – *Cam*; 3,4 – *Cassini*; 5,6 – *Corner*; 7,8 – *Const* и способах обработки обозначенных следующими типами линий: при ДСС – штриховыми, при УВС-М и СПК – сплошными

после поворота бандажа от положения, в котором началось резание на угол  $30^\circ$  в момент контакта (точка *a*, положение  $k=5205$ ) начала участка обработанной поверхности с копирным роликом, изменяется положение обрабатываемой поверхности бандажа относительно инструмента, и это приводит к изменению радиуса профиля бандажа на величину *ab* (рис. 3.21б). Затем после поворота бандажа на угол  $30^\circ$  происходит контакт этой погрешности с копирным роликом, что в свою очередь вызывает новое изменение радиуса, но уже на меньшую величину *cd* и так далее. Поэтому этот негативный процесс на протяжении одного прохода является затухающим.

При следующем проходе с той же глубиной резания эти погрешности формы служат причиной начала новых более существенных по величине и многочисленных по количеству последовательных повреждений, которые с ростом числа проходов приводят к нелинейному увеличению отклонения от круглости.

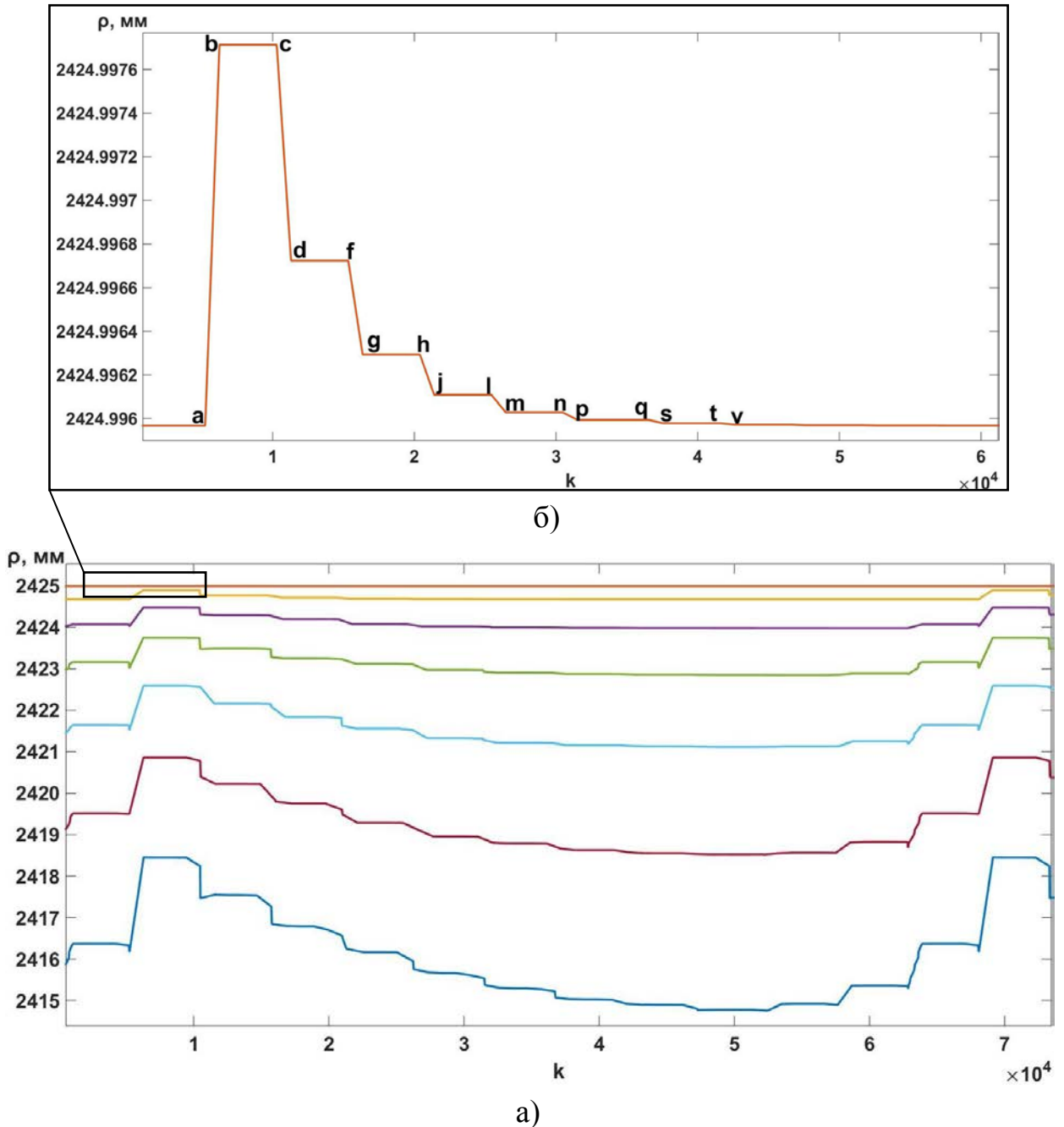


Рис. 3.21. Изменение полярного радиуса бандажа при моделировании обработки профиля  $Const$  с  $R_H=2425$  мм при  $t=0,1$  мм,  $W=10$  и базировании по изменяемой поверхности: а) развертки профиля после каждого прохода; б) формообразование погрешности на первом проходе



Таким образом, при базировании по изменяемой поверхности формообразование имеет связанные с исходными данными особенности только при приближении к ВРО. После чего оно во всех случаях сохраняет одинаковую тенденцию увеличения *EFK* (рис. 3.20).

Наличие такого экстремума в процессе формообразования подтверждает также и закономерность изменения при обработке траектории движения геометрического центра т. *O* профиля бандажа. Например, для профиля *Cam* при базировании по поверхности, полученной на предыдущем проходе (станки УВС-М и СПК) начальная траектория движения (рис. 3.2) при обработке постепенно трансформируется и при достижении ВРО принимает форму окружности. При этом центр профиля с ВРО будет неподвижен, а вокруг него по окружности с радиусом 2,54 мм будет перемещаться т. *O*.

Поэтому над опорой с этим бандажом корпус вращающейся печи будет, как и перед началом обработки совершать негативные перемещения, которые в среднем в 1,2 раза меньше начальных, но по абсолютной величине по-прежнему превышают допускаемые. Подобные результаты получаются при обработке этого профиля и станком с ДСС. В этих случаях радиальное биение также одинаково уменьшается на 60%.

Для профилей *Corner*, *Cassini* и *Camomile* при обработке до ВРО на УВС-М и СПК перемещения центра вращения корпуса вращающейся печи уменьшаются соответственно в 1,2; 1,6 и 2,5 раза, а радиальное биение на 45%, 28% и 57%.

Таким образом, восстановительная неуправляемая обработка бандажа приставными станками для рассмотренных погрешностей формы исходного профиля независимо от базирования не устраняет полностью негативные перемещения корпуса вращающейся печи. Они сохраняются и после выверки ее оси вращения.

Поэтому для полного устранения таких погрешностей формы бандажей требуется организация специальной управляемой обработки со снятием большого припуска. При этом исправление погрешности возможно только в том случае, если выполняются условия приближения нового профиля к вписанной в

исходный профиль окружности с центром в т.  $O$  и сохранения в нормируемом диапазоне толщины бандажа.

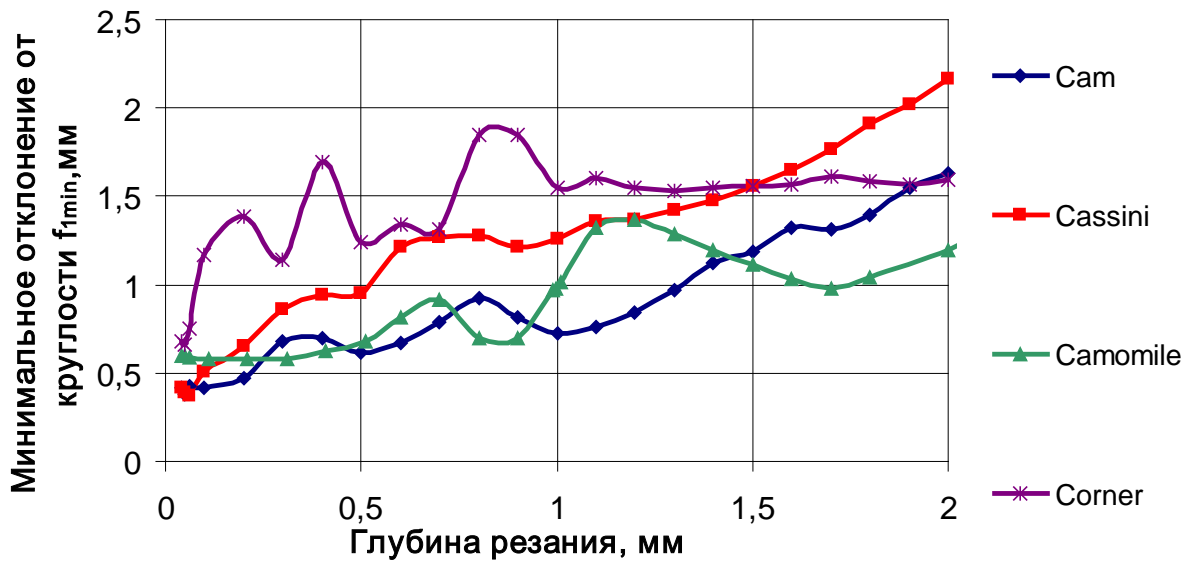


Рис. 3.22. Минимальные отклонения от круглости для каждой глубины резания, достигаемые при моделировании обработки на станке с ДСС исходного профиля *Cam*, *Cassini*, *Camomile* или *Corner*

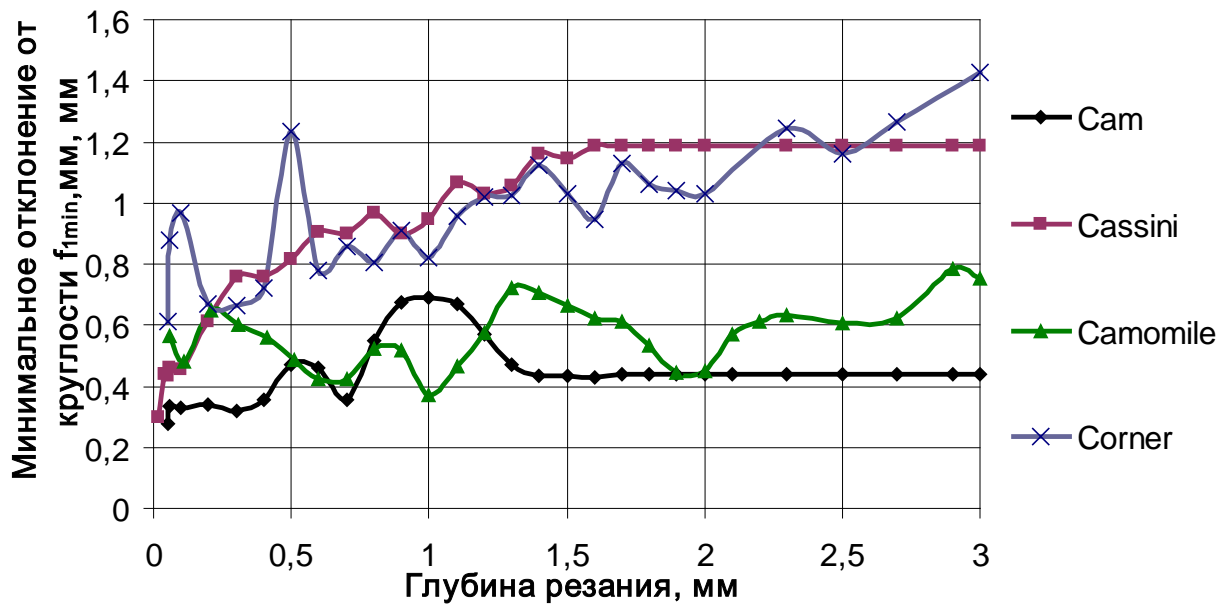


Рис. 3.23. Минимальные отклонения от круглости для каждой глубины резания, достигаемые при моделировании обработки на станках СПК или УВС-М исходного профиля *Cam*, *Cassini*, *Camomile* или *Corner*

С целью определения возможности приближения к ВРО за меньшее число проходов перейдем к анализу результатов минимизации отклонения от круглости, полученных при моделировании восстановительной обработки рассматриваемых

исходных профилей при базировании по изменяемой поверхности (рис. 3.22 и 3.23).

Для профиля *Cam* при использовании ДСС при одном проходе исправление формы (возможно при условии  $f_1 < EFK_0 = 1,33$  мм) выполняется только до глубины резания  $t = 1,5$  мм, а для профиля *Cassini* (при условии  $f_1 < EFK_0 = 2$  мм) до  $t = 1,8$  мм. Результаты обработки этих профилей (рис. 3.22) демонстрируют одинаковую тенденцию изменения *EFK* (меньшие значения для профиля *Cam*) и при увеличении глубины резания. Требуемое число проходов при этом несколько меньше для профиля *Cassini*.

Локальные минимумы функции  $f_2 = EFK(t_1, t_2)$  для этих двух профилей (рис. 3.24а и 3.24б) также находятся примерно в одной области малых значений глубин резания  $t_1$  и  $t_2$ . Причем для этой области выполняется условие (3.13), что обеспечивает наилучшее приближение к ВРО.

При этом  $t_1$  и  $t_2$  для профиля *Cam* при обработке с ДСС можно выбирать (при исходных данных примера) из уравнения прямой (рис. 3.21а):

$$t_1 = 0,99 - 0,88 \cdot t_2,$$

которая проходит через локальные минимумы функции  $f_2 = EFK(t_1, t_2)$ . Аналогично для профиля *Cassini* при выборе глубины резания на каждом проходе следует при условии  $t_2 \leq 0,4$  мм использовать уравнение (рис. 3.24б):

$$t_1 = 0,725 - 0,5 \cdot t_2.$$

Следует отметить, что в этом случае получается меньшее отклонение от круглости, чем при двухпроходной обработке с постоянной глубиной резания (см. табл. 3.13). Эта особенность выполняется также для профиля *Camomile*. Глубину резания при его двухпроходной обработке можно без ограничений выбирать с помощью уравнения (рис. 3.24г):

$$t_1 = 1,45 - 0,7 \cdot t_2.$$

При применении других сочетаний  $t_1$  и  $t_2$  (подставляя их в исходные данные расчетов при  $f_2 = const$ ) в совокупности получаем, что вариация минимального отклонения от круглости для *Cam* составит только  $k = 33\%$ , а для *Cassini*  $k = 30\%$ . То

есть эффективное использование режимов обработки с разной глубиной резания на каждом проходе крайне ограничено.

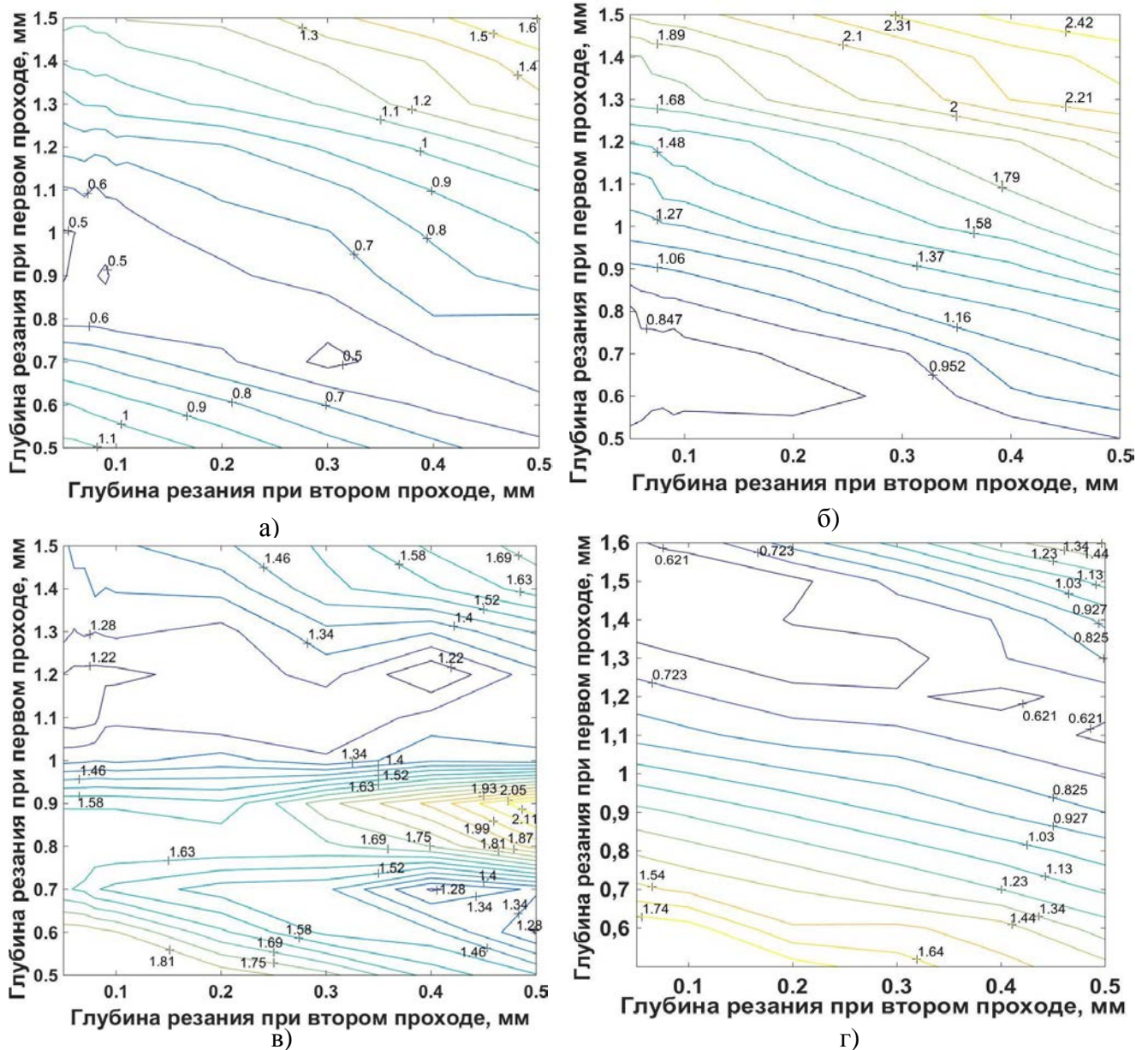


Рис. 3.24. Изменение отклонения от круглости  $f_2 = EFK(t_1, t_2)$  при моделировании двухпроходной обработки с разной глубиной резания на каждом проходе для бандажа с профилем: а) *Cam*; б) *Cassini*; в) *Corner*; г) *Camomile*

Близкие результаты для профилей *Cam* и *Cassini* связаны, прежде всего, с одинаковым видом их индикаторных диаграмм  $y_E = f(\varphi_1)$  (рис. 3.19 и приложение 2 рис. П.9). Несколько большие значения  $f_{1\min}$  для профиля *Cassini* (рис. 3.22) можно объяснить тем, что его радиальное биение  $ECR < 1$  мм. Поэтому при  $t \geq 1$  мм условие (3.13) не выполняется. Резание осуществляется непрерывно (не только в тех точках профиля, удаление которых необходимо для исправления погрешности), что повышает циклически изменяемое влияние обратных связей на

формообразование. Тогда отклонение от круглости изменяется по зависимости, подобной полученной при точении профиля *Const* (см. рис. 3.20).

Обработка профиля *Corner* имеет свои существенные отличия. Во-первых, отсутствуют ограничения по глубине резания (рис. 3.22), т.е. всегда выполняется условие исправления формы  $f_1 < 2$  мм. Однако в количественном отношении оно незначительно (см. табл. 3.13). Например, отклонение от круглости при одном проходе с ДСС уменьшается только на 0,47 мм (23,5%).

Во-вторых, при двух проходах с ДСС с разной глубиной резания минимум *EFK* не зависит от глубины резания при втором проходе (рис. 3.24в). При  $1,1 < t_1 < 1,2$  мм можно выбирать  $t_2$  из диапазона  $0,05 \leq t_2 \leq 0,45$  мм. Этот вариант по отклонению от круглости предпочтительнее обработки с  $W=1$  и  $W=2$  (см. табл. 3.13).

Вариация минимального отклонения от круглости при обработке станком с ДСС профиля *Corner* не превышает  $k=26\%$  при постоянной и  $k=23\%$  при переменной глубине резания на каждом проходе. Такая неравномерность связана с резкими изменениями формы профиля *Corner*. Они определяют интенсивность влияния обратной связи (ОС).

Следует отметить, что ОС является основной причиной, не позволяющей при обработке с ДСС всегда получать такие же результаты, как и при применении станков УВС-М или СПК (табл. 3.13).

Эти станки выгодно отличаются тем, что результаты их обработки действительны для существенного диапазона глубины резания ( $0,02 \leq t \leq 3$  мм). При глубине резания  $t > 1$  мм обеспечивают меньшее отклонение от круглости. Отклонение от круглости уменьшается для всех случаев (рис. 3.20). Поэтому обработка с переменной глубиной резания для станков УВС-М или СПК не рассматривалась.

Коэффициент эффективности, выраженный в процентах, получился примерно одинаковым для профилей *Cam* и *Cassini* (при обработке с ДСС соответственно  $k=38\%$  и  $k=39\%$ , а для станков УВС-М и СПК  $k=66\%$  и  $k=52\%$ ). Восстановительная обработка профиля *Corner* станками УВС-М и СПК

исправляет погрешность формы с вариацией  $k=54\%$ , а станками с ДСС только с  $k=26\%$ . Наибольший коэффициент эффективности  $k=74\%$  получается при обработке станками УВС-М и СПК профиля *Camomile* (при обработке с ДСС  $k=54\%$ ).

Для профилей *Cam* и *Corner* коэффициент эффективности исправления погрешности формы бандажа станками УВС-М или СПК на 28% больше, чем при применении станков ДСС. При обработке профиля *Cassini* это преимущество составляет только 13%.

Возможность исправления станками с ДСС и СПК погрешности формы существенно зависит от длины хорды между точками контакта базирующих поверхностей (см. хорды *AB*, *BC* и *CD* на рис. 2.17). Она влияет на масштаб измеряемого индикатором радиального биения *ECR*. Чем оно меньше, тем труднее в рамках условия (3.13) выбрать такую глубину резания на каждом проходе, которая необходима для неуправляемого приближения к ВРО при исправлении погрешности формы поперечного сечения бандажа.

Увеличение технологической базы для станков с ДСС ограничено возможностью конструктивной реализации. Влияние этой особенности при сравнении результатов обработки не учитывалось. Поэтому обработка станками СПК, не имеющими таких ограничений и показавшая в процессе моделирования положительные результаты, более перспективна.

### 3.3.5. Выводы

1. Погрешности формы бандажа вызывают изменения контактных напряжений, которые при продолжительной эксплуатации могут оказывать существенное влияние на малоцикловую усталостную прочность материала опорного ролика.

2. Погрешности положения опорного ролика вызывают неравномерное распределение напряжений по длине контактной линии. При смещении одной из опор от номинального положения более чем на 6 мм возможно появление наклепа и повреждений поверхности бандажа.

3. Концентрация контактных напряжений при смещении одной из опор от номинального положения возникает на локальном пятне контакта площадью менее 70%, расположенном на противоположной смещаемой стороне опоры кромки поверхности качения бандажа.

4. Механическая обработка бандажа переносными станками увеличивает контактные напряжения на поверхностях бандажа и ролика. При жестких (больше 4 МН/мм) номинально расположенных опорах в конце каждого прохода независимо от глубины резания контактные напряжения существенно (третья группа опасности) превышают допускаемые. Образование при этом зазора между поверхностями обработанного участка бандажа и опорного ролика увеличивает вероятность нарушения центрирования корпуса вращающейся печи и возникновения деформации обечайки.

5. При односторонней обработке в конце пути резания при глубине резания  $t \leq 1,2$  мм чем меньше жесткость оси и опоры, тем меньше максимальные контактные напряжения и больше поверхность базирования.

6. Погрешности расположения опорного ролика при односторонней обработке в конце пути резания уменьшают контактные напряжения и способствуют сохранению центрирования корпуса вращающейся печи.

7. Для сохранения контактной прочности поверхностей качения бандажа и ролика необходимо завершать каждый проход врезным шлифованием заключительного участка. При этом для исключения дополнительного нагружения обечайки будет лучше, если его выполнить по середине длины бандажа.

8. В процессе восстановительной обработки при жестких опорах изменение поверхности базирования на бандаже происходит в конце прохода, а при податливых опорах или при опорах с погрешностью расположения базирование изменяется в середине прохода.

9. Приставные станки обеспечивают исправление всех рассмотренных погрешностей формы бандажей. Максимальное уменьшение отклонения от круглости (при двух проходах) составляет 74%.

10. При прочих равных условиях меньшее отклонение от круглости получается при применении таких станков, у которых в процессе обработки базирование осуществляется по профилю, полученному на предыдущем проходе. Для них коэффициент эффективности исправления погрешности формы бандажей всегда больше 50%.

11. Особенности формообразования профилей бандажей зависят от вида погрешности формы. Максимальное уменьшение отклонения от круглости достигается для таких профилей, у которых индикаторная диаграмма представляет собой периодическую непрерывно дифференцируемую функцию, размах которой близок к удвоенной сумме глубин резания за всю операцию.

12. Процесс восстановительной обработки с неравномерным распределением припуска при базировании по изменяемой поверхности заключается в приближении к такой вписанной в исходный профиль окружности (ВРО), которая имеет с ним максимальное число равномерно распределенных точек касания. После достижения ВРО с увеличением числа проходов отклонение от круглости возрастает.

13. Для наибольшего уменьшения отклонения от круглости профиля бандажа при обработке с неравномерным распределением припуска его следует назначать равным в зависимости от состояния поверхности базирования в процессе резания: если она изменяется - то половине, а если нет - то всему радиальному биению бандажа, измеренному по середине прямой, связывающей точки базирования.

14. Восстановительная обработка с неравномерным распределением припуска по поверхности катания бандажа после исправления погрешности формы не обеспечивает соосность бандажа и корпуса вращающейся печи. Негативные перемещения корпуса печи над этими опорами сохраняются. Для их исключения необходимо построение специального технологического процесса с замкнутой системой управления положением инструмента.



#### 4. Экспериментальная восстановительная обработка поверхностей качения бандажей

Экспериментальные исследования обработки бандажей выполнялись с целью проверки закономерностей формообразования и контактного взаимодействия поверхностей качения, полученных при математическом моделировании этого процесса.

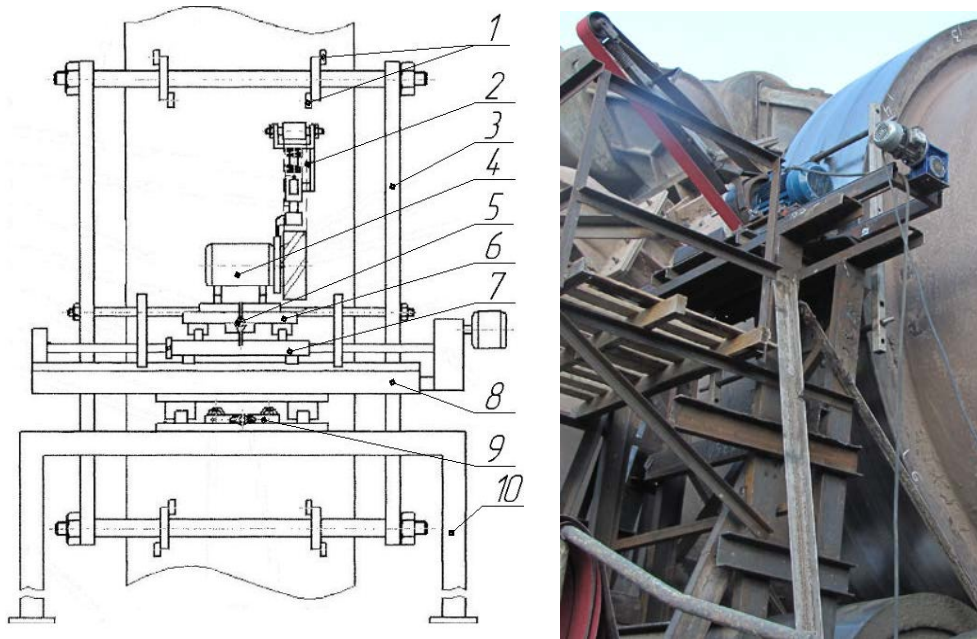


Рис. 4.1. Шлифовальный станок фирмы ООО «Це́мсервис» [67] и обработка бандажа вращающейся печи 5×185 м:

1 – ролики; 2 – абразивная лента; 3 – копировальный узел; 4 – электродвигатель; 5 – штурвал; 6 – суппорт; 7 – рабочий стол; 8 – станина; 9 – подпружиненное основание; 10 – рама

Для этого совместно с ООО "Це́мСервис" в условиях ЗАО "Осколце́мент" при непосредственном участии автора на цементной печи 5×185 м была проведена восстановительная обработка поверхности качения бандажа диаметром 6100 мм и длиной 1000 м.

#### 4.1. Методика экспериментального исследования формообразования профиля бандажа

##### 4.1.1. Оборудование и образцы

Для восстановительной обработки с неравномерным распределением припуска по поверхности качения бандажа использовался шлифовальный станок (рис. 4.1) фирмы ООО «Це́мсервис».

Он состоит из станины 8 с направляющими, на которых находится рабочий стол 7 [67]. На нем размещен поперечный суппорт 6 с электродвигателем привода ведущего шкива. Контакт с обрабатываемой поверхностью обеспечивают рама и попарно расположенные ролики 1, объединенные в копирующий узел 3, который, копируя погрешности формы, передает движение на поперечный суппорт 6. Поперечное перемещение суппорта 6 для настройки устройства и процесса резания осуществляется вручную вращением штурвала 5. Станина 8 соединена с подпружиненным основанием 9. Это позволяет компенсировать возможные биения, связанные с погрешностями формы обрабатываемой поверхности. Подпружиненное основание 9 крепится на раму 10 и шарнирно соединено с копирующим узлом 3. Инструментом в станке является абразивная лента 2, установленная на ведомый и ведущий шкив. Она приводится в движение от электродвигателя 4.

Станина станка размещалась на временных лесах, сваренных из стального металлического профиля (рис. 4.1).

В качестве экспериментального образца использовался бандаж типа П с погрешностью формы и повреждениями поверхности катания в виде раковин глубиной от 1,5 до 3 мм.

#### 4.1.2. Приборы и аппаратура

Для построения индикаторных диаграмм использовались показания индикатора часового типа (с электронной цифровой шкалой и интерфейсом), сохраняемые на компьютере в файле *Excel* (\*.xls) с интервалом в 1 с. Эти измерения с целью проверки дублировались стрелочным индикатором часового типа ИЧ-10. Для синхронизации и контроля показаний применялась их видеозапись в файл типа *mp4* с параметрами: ширина и высота кадра соответственно 1920 и 1080 пикселей, частота  $\nu=50$  кадров в секунду.

Индикаторы 1, 2 и видеокамера 3 закреплялись на штативах соответственно 4 и 5 (рис. 4.2). Для обеспечения надежности непрерывного контакта каждого индикатора с подвижной поверхностью банджа 6 использовались наконечники скольжения 7.

### 4.1.3. Порядок исследования

Восстановительная обработка опорного узла выполнялась без остановки функционирования вращающейся печи в условиях производства цементного клинкера на ЗАО "Осколцемент". Все операции проводились согласно технологическому процессу ремонта (табл. 4.1), разработанному, совместно с автором,



Рис. 4.2. Приборы и аппаратура экспериментального исследования специалистами ООО "ЦемСервис" и утвержденному руководством ЗАО "Осколцемент". Если размах индикаторной диаграммы после измерительной операции оказывается незначительным (в пределах до 1 мм), то операция "015 токарная" может не выполняться, а сразу выполняется операция "020 шлифовальная".

Работы проводились в следующей последовательности:

- измерялось биение каждого опорного ролика, выбирались параметры и режим восстановительной обработки его поверхности качения;
- выполнялась ленточно-шлифовальная обработка опорных роликов;
- для оценки базирования бандажа и необходимости регулировки опор контролировались (свинцовой проволокой) зазоры между поверхностями бандажа и ролика;
- изготавливалась опорная рама и на нее монтировался станок;
- определялось начальное положение инструмента;

- между опорными роликами под бандажом устанавливались измерительные устройства, и записывалась информация для построения индикаторной диаграммы и определения радиального биения бандажа перед началом обработки;

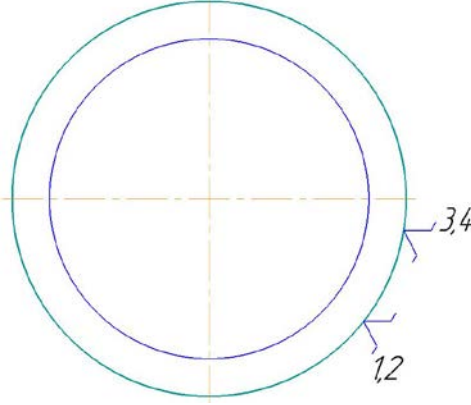
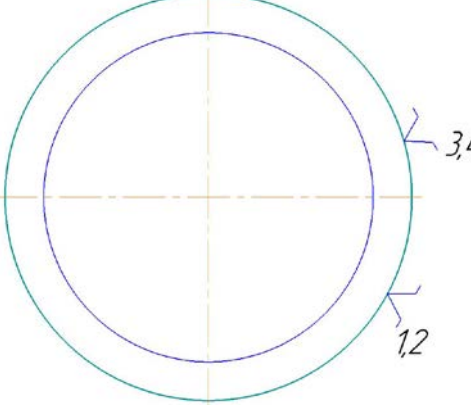
- на основании анализа индикаторной диаграммы, моделирования профиля (в программах *Form* и *Motion*) бандажа и его восстановительной обработки в программе *Working* определялись рациональные параметры и режим ленточно-абразивного шлифования бандажа;

- инструмент (вместе с приводом главного движения) фиксировали на расстоянии от начального положения равном принятой глубине резания и выполняли ленточно-абразивное шлифование частей поверхности бандажа, касающихся инструмента;

Таблица 4.1

#### Технологический процесс ремонта бандаж вращающейся печи

№ операц.	Наименование операции и содержание переходов	Технологические эскизы обработки	Оборудование и оснастка
005	Измерительная Установка индикаторов между опорами Подключение приборов фиксации показаний индикаторов Построение индикаторной диаграммы Назначение припуска на обработку		Индикатор часового типа ИЧ-10 Индикатор часового типа с электронной цифровой шкалой и интерфейсом Видеокамера, штатив
010	Сборочная Сборка временных лесов, сваренных из стального металлического профиля и монтаж станка		Комплект мобильного оборудования

015	Токарная Токарная обработка поверхности качения бандажа		Станок УВС-01 с ДСС Резец прямой проходной Т15К10 $Z_{\text{общ}} = 1,5-3 \text{ мм}$ $S = 2 \text{ мм/об}$ $t = 1,5 \text{ мм}$ $T_o = 501 \text{ мин}$
020	Шлифовальная Шлифование поверхности качения бандажа		Шлифовальный станок фирмы ООО «Цемсервис» Шлифовальная лента ХК 870 X VSM $Z_{\text{общ}} = 1,2 \text{ мм}$ $S = 0,12 \text{ мм/об}$ $t = 0,12 \text{ мм}$ $T_o = 438 \text{ мин}$
021	Контрольная Построение индикаторной диаграммы после обработки		Индикатор часового типа ИЧ-10 Индикатор часового типа с электронной цифровой шкалой и интерфейсом Видеокамера, штатив

- после окончания рабочего хода проводили измерение биения бандажа и сохраняли показания индикатора за пять оборотов бандажа;

- на всех следующих переходах после изменения положения инструмента на расстояние, равное глубине резания, повторялись рассмотренные выше операции обработки и измерения;

- после завершения технологического процесса выполняли статистическую обработку результатов измерений и оценивали их корреляцию с результатами математического моделирования.



#### 4.1.4. Экспериментальная обработка поверхности качения бандажа шлифованием

Выполненная на первом этапе технологического процесса ремонта опорного узла цементной печи обработка поверхностей качения опорных роликов способствовала уменьшению влияния на результаты экспериментального исследования

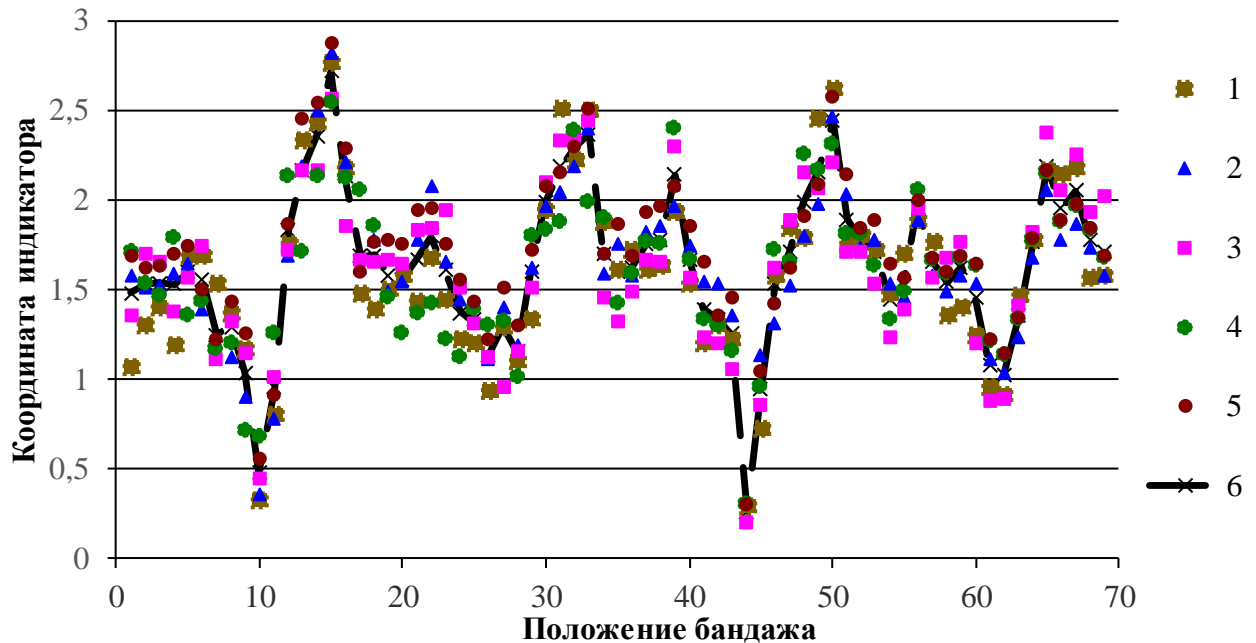


Рис. 4.3. Индикаторная диаграмма биения бандажа перед началом обработки: 1-5 измерения на каждом из пяти оборотов; 6- математическое ожидание погрешностей их формы и расположения.

Перед началом восстановительной обработки бандажа измерения его биения в течении пяти оборотов (рис. 4.3) проводились с целью выбора режима и параметров обработки. Для этого, учитывая переменную погрешность измерений, их статистической обработкой получено, что математическое ожидание  $y_p=f_p(k_p)$  с вероятностью 0,95 лежит внутри доверительного интервала (при  $n=5$  и  $T_{\text{табл.}}=2,5706$ ):

$$\varepsilon_{\max}(k_p)=1,1496 \cdot \sigma_{\max}(k_p), \quad (4.1)$$

где  $\sigma_{\max}(k_p)$  – максимальное среднеквадратическое отклонение получено в положении бандажа  $k_p=12$ . При  $\sigma_{\max}(12)=0,091$  мм найдено, что  $\varepsilon_{\max}(12)=0,1046$  мм и радиальное биение для функции  $y_p=f_p(k_p)$  (рис. 4.3)  $ECR_p=2,46$  мм, а с учетом доверительного интервала, оно составляет:

$$ECR = 2,46 + 2 \cdot 0,1046 = 2,668 \text{ мм.}$$

Функция  $y_p=f_p(k_p)$  имеет явно выраженное значение  $y_p(k_{p\max})=\lambda$ , относительно которого определяются положительная и отрицательная амплитуды. Найдем  $\lambda$ , как среднее значение размаха математического ожидания:

$$\lambda=(y_{E\max}-y_{E\min})\cdot 0,5=(2,8226-0,1546)\cdot 0,5=1,334,$$

$y_{E\max}$  и  $y_{E\min}$  – соответственно крайние верхнее и нижнее положения индикатора:

$$y_{E\max}=y_{p\max}(15)+\varepsilon_{\max}(12)=2,718+0,1046=2,8226 \text{ мм},$$

$$y_{E\min}=y_{p\min}(44)-\varepsilon_{\max}(12)=0,2592-0,1046=0,1546 \text{ мм}.$$

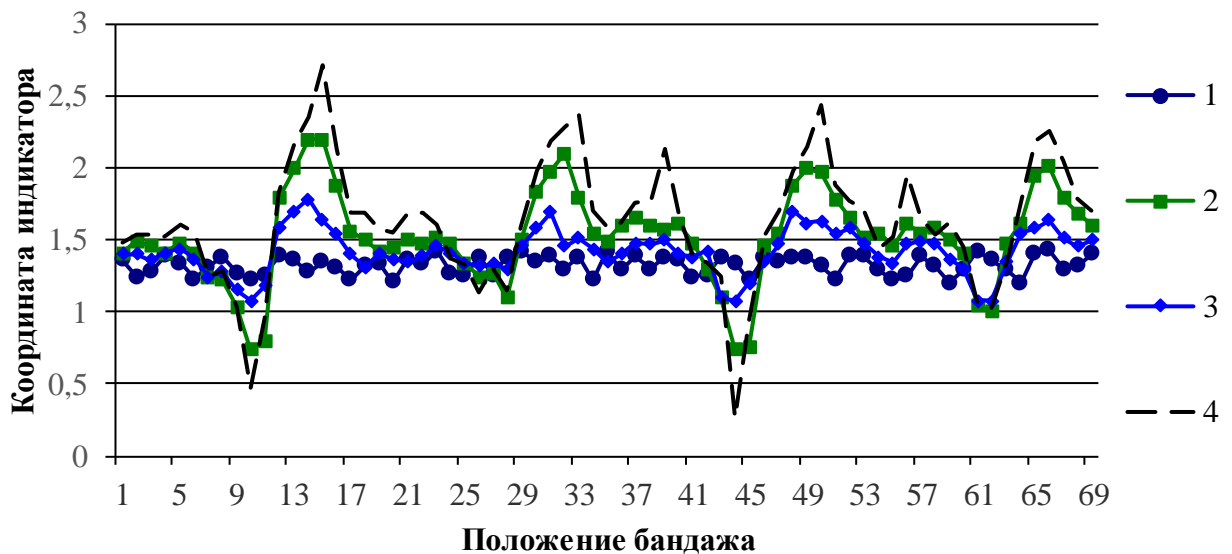


Рис. 4.4. Изменение индикаторных диаграмм биения бандажа в процессе восстановительной обработки: 1, 2 и 3 соответственно на 10, 4 и 8 рабочих ходах; 4-математическое ожидание

Тогда согласно (см. п. 3.3.4) припуск на обработку:

$$z_\lambda=(\lambda-y_{E\min})=1,334-0,1546=1,18 \text{ мм}.$$

При базировании по изменяемой поверхности для выбора параметров обработки используя условие (3.13) получили:

$$\sum_{i=1}^{W_s} t_i = 1,18,$$

и назначили для встречного ленточно-абразивного шлифования с неравномерным распределением припуска по обрабатываемой поверхности следующие параметры: глубина и скорость резания соответственно  $t=0,12$  мм и  $V=23$  м/с; число рабочих ходов  $W_s=10$ .

При этом для проверки эффективности уменьшения отклонения от круглости формы поперечного сечения бандажа выполнено моделирование его начального

профиля (в программах *Form* и *Motion*) и восстановительной обработки в программе *Working* (табл. 4.2).

Таблица 4.2

**Результаты экспериментальной восстановительной обработки**

Номер рабочего хода, <i>W</i>	Радиальное биение, мм		Стандартное отклонение, мм	Коэффициент вариации	Коэффициент корреляции
	моделирование	обработка			
0	2,54	2,61	0,049497	26,3	0,92
1	2,2	2,25	0,035355	28,2	0,96
2	1,92	1,87	0,035355	31,5	0,91
3	1,61	1,67	0,042426	48,4	0,88
4	1,38	1,46	0,056569	30,6	0,92
5	1,18	1,21	0,021213	29,7	0,78
6	0,94	0,97	0,021213	36,4	0,76
7	0,74	0,76	0,014142	48,5	0,82
8	0,55	0,60	0,035355	56,2	0,64
9	0,38	0,41	0,021213	52,1	0,42
10	0,21	0,23	0,014142	49,8	0,21

Сравнение этих результатов расчетов (рис.4.4) с показаниями индикаторов, полученными в процессе экспериментальной обработки подтвердило, что радиальное биение и отклонение от круглости профиля бандажа уменьшаются только до тех пор, пока инструмент не начнет удалять материал непрерывно. Припуск, необходимый для выполнения этого условия, найден правильно. Радиальное биение уменьшилось более чем в десять раз. При этом его доверительный интервал лежит внутри погрешности измерений.

## 4.2. Методика исследования изменения в процессе резания контактного взаимодействия бандажа и опорного ролика

### 4.2.1. Оборудование и образцы

Экспериментальное исследование выполнялось в процессе удаления с поверхности катания бандажа раковин глубиной 3,5 мм. Для этого использовался станок УВС-01 с ДСС (рис. 1.8 и 4.5).

Для размещения станка УВС-01 (ДСС) на опоре печи использовались опорные стойки 1 и 2 (рис.4.6), которые имеют возможность фиксированного осевого пе-



ремещения при монтаже и для базирования на корпусах подшипников



Рис. 4.5. Обработка бандажа вращающейся печи 5x185 м станком УВС-01 с ДСС: 1 – бандаж; 2 – корпус печи; 3 – ДСС; 4 – резец; 5 – направляющая станка; 6 – опорная стойка; 7 – сменные технологические наладки

роликоопор 5, они снабжены сменными технологическими наладками 3 и 4. В

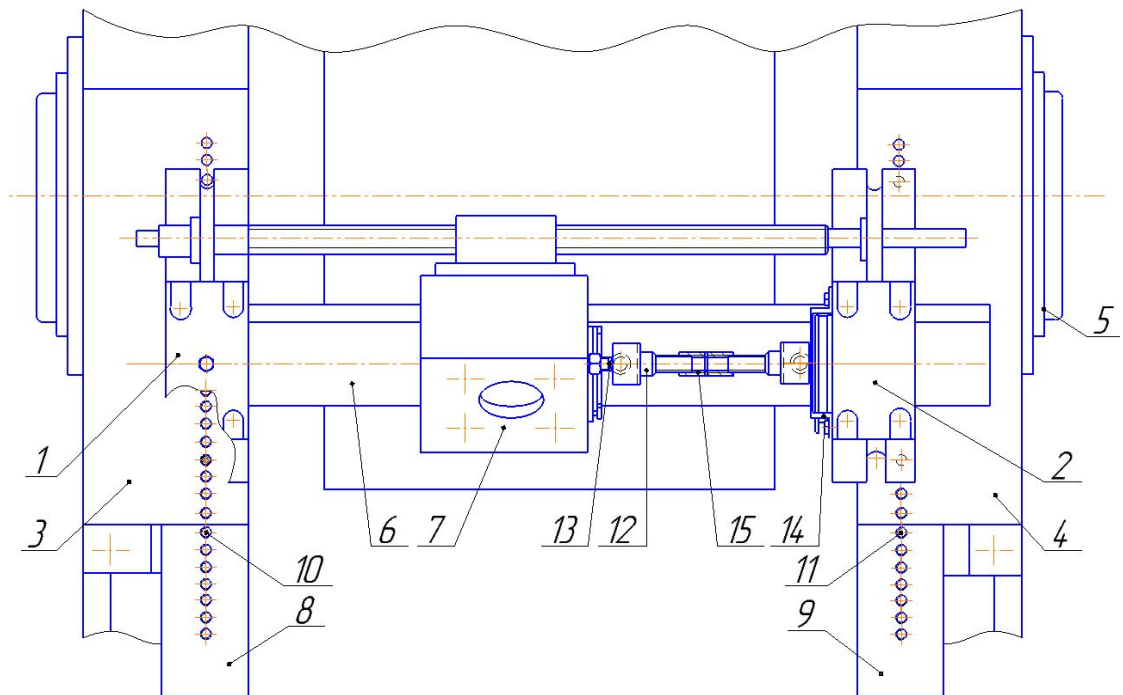


Рис. 4.6. Монтаж станка УВС-01 (патенты на полезные модели № 166871 и № 169072)

опорные стойки установлены направляющая 6 с продольным суппортом 7. Для

удобства монтажа и беспрепятственной регулировки на сменных технологических наладках использовались монтажные площадки 8 и 9. На них имеется ряд отверстий 10 и 11, вдоль которых осуществлялась поперечная регулировка опорных стоек станка относительно обрабатываемой поверхности.

При монтаже станка (рис. 4.6) из-за различий между конструкциями роlikоопор требовалась и продольная регулировка опорных стоек станка. Она осуществлялась тягой 12, которая устанавливалась в специальные кронштейны 13, 14, предварительно закрепленные на опорных стойках и продольном суппорте станка. Регулировка опорной стойки осуществлялась путем перемещения продольного суппорта. После совпадения отверстий опорной стойки с рядом отверстий 11 опорную стойку закрепляли.

#### 4.2.2. Приборы и аппаратура

Контактное взаимодействие между бандажом и роликом оценивалось по изменению в процессе резания кратчайшего в радиальном направлении расстояния (зазора) между их рабочими поверхностями. Для его измерения использовалась (рис. 4.7) свинцовая проволока 1 по ГОСТ 3778-98 С1, которая подавалась через направляющую 2 в определенную точку неподвижной системы координат нор-



Рис. 4.7. Приспособление для обеспечения направления свинцовой проволоки в измеряемый зазор между бандажом и опорным роликом в принятых координатах  $u_{sk}$  точек измерения малая проекция центра которой совпадает с левым торцом бандажа. Направляющие 2 расположены в приспособлении 3, закрепленном на раме роlikоопоры. Толщина проволоки измерялась микрометром «Эталон» МК25-1 ГОСТ 6507-90.

### 4.2.3 Порядок исследования

Профилактическая обработка поверхности катания бандажа выполнялась без остановки функционирования вращающейся печи согласно технологическому процессу ремонта после восстановительной обработки шлифованием бандажа и опорного ролика.

Работы проводились в следующей последовательности:

- на корпуса подшипников монтировались сменные технологические наладки с монтажными площадками, на которые устанавливались и регулировались узлы станка УВС-01 (ДСС);

- с другой стороны (от станка) роликоопоры на ее фундаменте закреплялось и регулировалось приспособление с направляющими для проволоки;

- после начала обработки через каждые 100 мм продольной подачи останавливали инструмент и подавали проволоку  $\varnothing 2,0$  мм через соответствующие направляющие в сужающееся пространство между бандажом и роликом (рис. 4.7);

- после деформации проволоки в зазоре между поверхностями бандажа и ролика измеряли микрометром в десяти точках, расположенных с шагом 50 мм по длине проволоки ее толщину (рис. 4.8);

- после каждого рабочего хода с помощью проволоки  $\varnothing 1,5$  мм в каждой направляющей контролировали (по отсутствию зазора) базирование бандажа на ролике;

- после завершения технологического процесса выполняли статистическую обработку результатов измерений и оценивали их корреляцию с результатами математического моделирования.

### 4.2.4. Изменение контактного взаимодействия в процессе лезвийной обработки поверхности качения бандажа

Проверка достоверности конечно-элементной модели контактного взаимодействия между бандажом и роликом осуществлялась путем измерения в процессе резания деформаций обработанного участка бандажа. При экспериментальной обработке они оценивались по среднему арифметическому  $a_{ki}$  десяти измерений за-

зора (табл. 4.3) в выбранных точках прямой на расстояниях  $u_{c_k}$  (где  $k=1,2...5$ ) от левой кромки банджа при различных положениях инструмента  $L_i$  (где  $i=1,2...9$ ).

При математическом моделировании для выбранных положений инструмента  $L_i$  при одном и том же нагружении формировали конечно-элементную модель контактного взаимодействия между банджом и роликом. После выполнения расчета, используя навигатор постпроцессора в пакете с решением, выбирали "Пере-

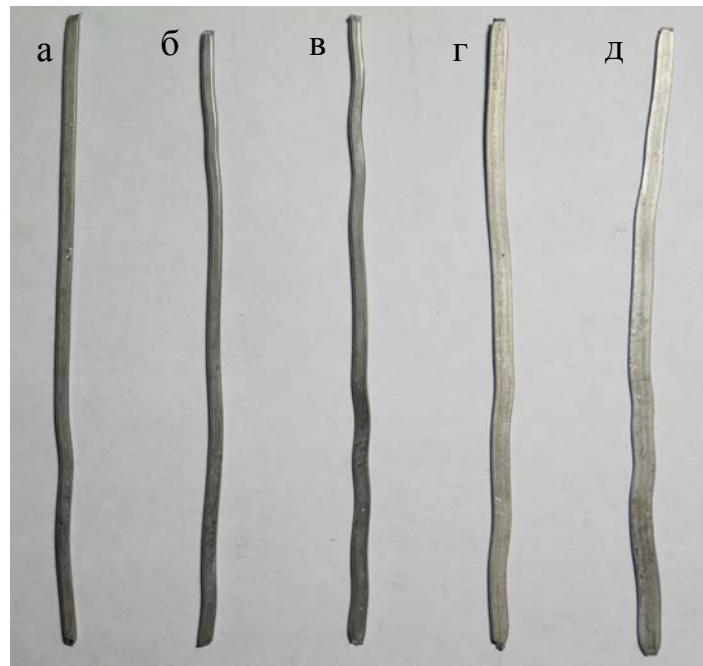


Рис. 4.8. Деформация и толщина (мм) проволоки: а) 1,462; б) 1,398; в) 1,312; г) 1,058; д) 0,641 в процессе восстановительной обработки при  $u_{c_k}=400$  мм и пути резания  $L_i$  соответственно 500, 600, 700, 800, 900 мм

мещение – по узлам –  $Z$ ", где для двух точек с одинаковыми координатами  $x_{c_j}$ ,  $u_{c_j}$  (где  $j=1,2$ ) при  $u_{c_j}=u_{c_{ki}}$  находили их положения  $z_{c_j}$  на вертикальной оси и вычисляли расстояние:

$$b_{ki}=z_{c_1}-z_{c_2},$$

между ними (табл. 4.3).

Для сравнения результатов математического моделирования и экспериментальной обработки сначала определялась абсолютная погрешность:

$$\Delta_{ki} = | a_{ki} - b_{ki} |,$$

а затем показатели сравнения: среднее арифметическое, стандартное отклонение, коэффициенты вариации и корреляции.

Эти результаты продемонстрировали существенную корреляцию закономерностей изменения зазора между бандажом и роликом при математическом моделировании и экспериментальной обработке. Абсолютная погрешность между ними не превышает 10%, стандартное отклонение составляет тысячные доли, а ко-

Таблица 4.3

**Изменение радиального зазора между бандажом и опорным роликом при экспериментальной обработке (в числителе) и математическом моделировании (в знаменателе)**

Координаты уск точек измерения (от левой кромки бандажа), мм	Путь резания $L_i$ (от левой кромки бандажа), мм								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	1,451/1,5	1,452/ 1,495	1,411/ 1,474	1,485/ 1,418	1,219/ 1,299	1,151/ 1,082	0,664/ 0,726	–	–
100	–	1,398/ 1,498	1,401/ 1,485	1,385/ 1,445	1,295/ 1,352	1,251/ 1,175	0,791/ 0,874	–	–
200	–	–	1,455/ 1,495	1,405/ 1,471	1,458/ 1,404	1,313/ 1,266	0,978/ 1,019	0,574/ 0,618	–
300	–	–	–	1,405/ 1,491	1,378/ 1,451	1,399/ 1,352	1,101/ 1,160	0,901/ 0,831	–
400	–	–	–	–	1,462/ 1,486	1,398/ 1,426	1,312/ 1,288	1,058/ 1,033	0,641/ 0,611

Примечание: знак "–" обозначает невозможность измерения ввиду малости зазора (меньше 0,3 мм)

эффицент корреляции больше чем 0,9 при средней степени рассеивания данных (коэффициент вариации меньше 20%).

Таким образом, конечно-элементная модель достоверно описывает контактное взаимодействие между бандажом и роликом, и ее можно использовать для оценки влияния процесса обработки на базирование бандажа на ролике и напряженно-деформированное состояние их рабочих поверхностей с учетом различных погрешностей положения.

### 4.3. Выводы по разделу

1. Результаты экспериментального исследования формообразования профиля бандажа в процессе его шлифования подтвердили возможность исправления погрешности формы бандажа путем неравномерного распределения припуска по обрабатываемой поверхности.

2. Результаты экспериментальной обработки профиля бандажа подтверждают результаты компьютерного моделирования и обосновывают возможность

применения кинематической модели для определения режимов и способов обработки поверхности качения, обеспечивающих минимальное отклонение от круглости профиля бандажа и снижение перемещений центра корпуса печи над этой опорой.

3. Результаты экспериментального исследования в процессе резания контактного взаимодействия бандажа и опорного ролика подтвердили его изменение по длине обработанного участка и сохранение базирования на остальной части начального контакта.

4. Результаты экспериментального исследования изменения в процессе резания контактного взаимодействия бандажа и опорного ролика продемонстрировали существенную корреляцию закономерностей изменения зазора между бандажом и роликом с результатами математического моделирования на конечно-элементной модели.

5. Разработаны и проверены на практике патентно защищенные средства технологического оснащения и оборудования для исправления погрешности формы бандажей вращающейся печи.

6. Осуществлено промышленное внедрение технологического процесса обработки с неравномерным распределением припуска совместно с ООО "Цемсервис" в условиях производства «Осколцемент» холдинга «Евроцемент групп». Доказаны возможность уменьшения девиаций корпуса печи путем исправления погрешности формы бандажа и изменения при этом его поверхности базирования на опорном ролике.

### 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 допусковые 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) от 1 мм до 5 мм, его жесткость в сечении силовой плоскостью от 0,8 МН/мм до 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.



### Список литературы

1. А.с. № 252811 СССР МКИ 4 В 23В 5/32 Устройство для проточки громоздких вращающихся деталей типа печей для обжига / Н.И. Курепов, А.М. Волков, В.С. Платонов, НИИ Цемент – 1218972/25-8 – Заявл. 13.02.68; Оpubл. 22.09.69 Бюл. №29 // Открытия. Изобретения. – 1969. - № 29. – С. 140.
2. А.с. № 317472 СССР, МПК В 23b 5/20. Устройство для обточки крупногабаритных изделий / Д.О. Гиндус, А.П. Усов, А.М. Соломин, М.К. Тихонова, Г.А. Хонгидоров (СССР). – №1362345/25-8; заявл. 01.09.1969; опубл. 19.10.71, Бюл.№31. – 3с.
3. А.с. № 1306648 СССР, МКИ 4 В 23В 5/32. Станок для проточки бандажей и роликов / Н.А. Пелипенко, А.А. Погонин, И.В. Шрубченко (СССР). – №3995076/31–08; заявл. 25.12.85; опубл. 30.04.87, Бюл.№16. – 2 с.
4. А.с. № 1346340 СССР, МКИ 4 В 23В 5/32. Станок для обработки бандажей и опорных роликов вращающихся печей / Н.А. Пелипенко, В.И. Рязанов, А.А. Погонин (СССР). – №4000133/31-08; заявл.30.12.85; опубл. 23.10.87, Бюл.№39. – 2с.
5. Алехин, А. Решение контактных задач в АРМ Structure3D [Электронный ресурс]/ А. Алехин, В. Прокопов // САПР и графика. – 2007. №7
6. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т.1.- 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
7. Банит, Ф. Г. Механическое оборудование цементных заводов: Учебник для техникумов пром-сти строит. материалов / Ф. Г. Банит, О. А. Несвижский. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 1975. - 318 с.
8. Билецкий, С.М. и др Искривление оси корпуса вращающейся печи в процессе эксплуатации // Цемент. — 1973.— № 3. — С. 14.
9. Билецкий, С.М. Опыт эксплуатации печи размером 5x185 м с опорами на пневмоподушках / С.М. Билецкий, К.Ф. Матвиенко, В.А.Чурюмов и др. // Цемент. — 1976. — № 2. — С. 14–15.
10. Боганов, А.И. Вращающиеся печи цементной промышленности / Под ред. канд. техн. наук П. В. Левченко и инж. Е. А. Долганова. - Москва : Машиностроение, 1965. - 319 с.
11. Богданов, В.С. Технологические комплексы и механическое оборудование предприятий стройиндустрии: Учебник / В.С. Богданов, А.С. Ильин, С.Б. Булгаков. – СПб.: Проспект науки, 2010.- 624 с.
12. Бондаренко, В.Н. Ремонтно-восстановительная обработка поверхностей катания опорных узлов цементных печей мобильными станками / В.Н. Бондаренко, А.А. Погонин, С.Н. Санин, А.Г. Схиртладзе //Ремонт, восстановление, модернизация. 2005. № 1. С. 13-16.

13. Бондаренко, Ю.А. Определение возможности обработки крупногабаритных деталей на приставных станках / Ю.А. Бондаренко, М.А. Федоренко, А.А. Погонин //СТИН. 2005. № 7. С. 37-38.
14. Бржозовский, Б.М. Обеспечение технологической надежности при бесцентровой абразивной обработке: монография / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 216 с.
15. Вайс, С.Д. Исследования бесцентровых шлифовальных станков / С.Д. Вайс, Б.И. Черпаков, Я.М. Ашкиназий // СТИН. 2001 № 8 С. 23-28.
16. Вerezуб, В.Н. Шлифование абразивными лентами / В.Н. Вerezуб. - Москва : Машиностроение, 1972. - 104 с.
17. Геббель, И.Д. Кинематика переноса некруглости базы на обрабатываемую поверхность при шлифовании на самоустанавливающихся башмаках / И.Д. Геббель // Вестник машиностроения. 1969. №11. С. 52-55.
18. Гебхарт, В. Как отремонтировать изношенные опорные ролики и бандажи цементных печей / В. Гебхарт // Цемент и его применение. - 2006. № 6. С. 64-69.
19. Гончаров, М.С. Анализ формообразования при шлифовании станком на вращающемся кронштейне профиля бандажа / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // сб. докладов IX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс». Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2016. – Том 1. – С. 54-56.
20. Гончаров, М.С. Влияние ошибок расположения на контактную прочность ролика / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // Сб. докл. Международная научно-техническая конференция молодых ученых. Белгород, 2014.
21. Гончаров, М.С. Идентификация параметров мобильной технологической системы / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко // сб. докладов VIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс». Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2015. – Том 1. – С. 58-60.
22. Гончаров, М.С. Исследование пятна контакта бандажа цементной печи и опорного ролика / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // сб. докл. Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова. Белгород, 2013. С. 536-540.
23. 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

24. Гончаров, М.С. Кинематическая модель системы бандаж-ролики-шлифовальный станок / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // сб. докладов IX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс». Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2016. – Том 1. – С. 17-20.

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

26. Гончаров, М.С. Контактные проявления ошибок расположения / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко // сб. докладов VIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс». Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2015. – Том 1. – С. 61-63.

27. Гончаров, М.С. Моделирование контактного взаимодействия при восстановительной обработке бандажей [Электронный ресурс]/ М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // Сб. докл. Международная научно-техническая конференция молодых ученых. Белгород, 2017.

28. Гончаров, М.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния технологической системы [Электронный ресурс]/ М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко //Сборник материалов IV-ой Международной студенческой научно-практической конференции «Техника и технологии машиностроения» (25-30 марта 2015 г.), Омск: ОмГТУ. 2015. С. 49-53.

29. Гончаров, М.С. Моделирование пятна контакта при погрешности положения опорного ролика в процессе восстановительной обработки бандаж [Электронный ресурс]/ М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // сб. докладов IX Международного молодежного форума «Образование. Наука. Производство». Белгород, 2017.

30. Гончаров, М.С. Моделирование технологической системы мобильного оборудования [Текст] / М.С. Гончаров, Л.В. Мурыгина, И.В. Шрубченко, Н.А. Щетинин // сб. докладов Юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXI научные чтения). Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. – С. 223-228.

31. 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

32. Гончаров, М.С. Оценка влияния жесткости основания на функционирование роlikоопоры [Электронный ресурс]/ М.С. Гончаров, Н.Н. Гордиенко // Сб. докл. Международная научно-техническая конференция молодых ученых. Белгород, 2014.

33. Гончаров, М.С. Оценка влияния ошибок расположения роlikоопоры на деформации ее деталей [Электронный ресурс]/ М.С. Гончаров, И.Ю. Шапоров // Сб. докл. Международная научно-техническая конференция молодых ученых. Белгород, 2014.

34. Гончаров, М.С. Оценка влияния ошибок формы бандажа на параметры ленточного шлифования [Электронный ресурс] / М.С. Гончаров, А.А. Щендрыгин // сб. докл. Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2016. С. 2330-2334.

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

36. Дроздов, Н. Е. Эксплуатация, ремонт и испытание оборудования предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: Учебник для вузов по спец. "Мех. оборуд. предприятий строит. материалов, изделий и конструкций". - Москва : Высш. школа, 1979. - 312 с.

37. Дуганов, В.Я. Обеспечение точности механической обработки крупногабаритных колец: монография / В. Я. Дуганов. - Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2013. - 129 с.

38. Дуганов, В.Я. Определение передаточных отношений и коэффициента исправления формы деформированного кольца цементных печей при его бесцентровой обработке / В.Я. Дуганов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 9. С. 47-51.

39. Дунин, Н.А. Влияние поверхностного слоя деталей на эксплуатационные свойства изделий: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Н. А. Дунин ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Казанский гос. технический ун-т им. А. Н. Туполева. - Казань : Изд-во Казанского гос. технического ун-та, 2006. – 112 с.

40. ЗАО ММК «Мосинтраст» шлифовка бандажей [Электронный ресурс]. URL: <http://mosintrast.ru> (20.02.2019).

41. Зубарев, Ю.М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемышев. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2010. - 303 с.

42. Кальченко, В.И. Шлифование криволинейных поверхностей крупногабаритных деталей / В. И. Кальченко. – М. : Машиностроение, 1979. - 160 с.

43. Козулин, С.М. Методы восстановления бандажей вращающихся печей / С. М. Козулин, И. И. Лычко, М. Г. Козулин// Автоматическая сварка – 2007. - №10. – С.40-47.

44. Компания «ГеоЦем» механическая обработка [Электронный ресурс]. URL: <http://geosem.info/index.php?id=5> (20.02.2019).

45. Компания СОМЭКС восстановление бандажей и роликов [Электронный ресурс]. URL: [http://www.somex.ru/katalog/gorno-metalurgicheskoe\\_oborudovanie/remont\\_i\\_vosstanovlenie/5158/](http://www.somex.ru/katalog/gorno-metalurgicheskoe_oborudovanie/remont_i_vosstanovlenie/5158/) (20.02.2019).

46. Корозо, В. И. Вращающиеся печи и их техническое обслуживание. – Москва. 1963. - 44 с.

47. Корсаков, В.С. Основы технологии машиностроения / В.С. Корсаков. – М.: Высшая школа, 1977. – 411 с.

48. Кудрявцев, И.В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин / Науч.-техн. о-во машиностроит. пром-сти. Ун-т техн. прогресса в машиностроении. Заоч. курсы усовершенствования инженеров-конструкторов. - 2-е изд. - Москва : Машиностроение, 1969. - 100 с.

49. Кукакин, П.А. Заварка трещин на бандаже вращающейся действующей печи размером 4,5х170 м / П.А. Кукакин // Свароч. пр-во. — 1968. — № 12. — С. 33–34.

50. Лебедев, Л.В. Технология машиностроения: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности "Технология машиностроения" направления подгот. "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных пр-в" / Л.В. Лебедев, В.У. Мнацакян, А.А. Погонин и др.. - Москва : Академия, 2006 (Тверь : Тверской полиграфкомбинат). - 526 с.

51. Лоскутов, Ю.А. Механическое оборудование предприятий по производствужущих строительных материалов: [Учеб. для техникумов пром-сти строит. материалов]/ Ю.А. Лоскутов, В.М. Максимов, В.В. Веселовский; Под общ. ред. Ю.А. Лоскутова. М: Машиностроение, 1986.-376 с.

52. Маслова, И.В. Дистанционная диагностика состояния опорных деталей сушильных барабанов / И.В. Маслова, С.Ю. Лозовая, М.С. Чепчуров //

Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 653–658.

53. Маслова, И.В. Обоснование использования управляемого процесса при восстановлении формы крупногабаритного тела вращения, не имеющего стационарную ось вращения / И.В. Маслова, А.Н. Блудов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №3. С. 76-79.

54. ММК «Мосинтраст» Ремонтно-восстановительные работы [Электронный ресурс]. URL: <http://mosintrast.ru/service/repair-work> (20.02.2019).

55. Мрочек, Ж.А. Процессы шлифования в машиностроении : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по машиностроительным и приборостроительным специальностям / Ж. А. Мрочек, М. Г. Киселев, Л. М. Кожуро. - Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2013. - 358 с.

56. Мурыгина, Л.В. Математическая модель оптимизации ленточно-абразивной обработки базовых поверхностей опор технологических барабанов / Л.В. Мурыгина, И.В. Шрубченко // СТИН. 2012. №3. С.31-34.

57. Мурыгина, Л.В. Моделирование чистовой обработки базовых поверхностей опор технологических барабанов / Л.В. Мурыгина, И.В. Шрубченко // Технология машиностроения. 2011. №9. С. 57-60.

58. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / Л.Г. Одинцов. - М. : Машиностроение, 1987. - 327 с.

59. ООО «МосХимЦемСервис» технологическое обслуживание и восстановление промышленного оборудования [Электронный ресурс]. URL: [http://moshimtsemservis.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1:okompanii&catid=2](http://moshimtsemservis.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=1:okompanii&catid=2) (20.02.2019).

60. ООО «ЦемСервис» [Электронный ресурс]. URL: <http://xn--b1afanzfe1b.xn--p1ai/uslugi.html> (20.02.2019).

61. Орлов, А.В. Контактная прочность и расчет тяжело нагруженных опор качения / А.В. Орлов. – М.: Машиностроение, 1987. – 112 с.

62. Орлов, А.В. Остаточные деформации при контактном нагружении / А.В. Орлов, С.В. Пинегин. - М.: Наука, 1971. 62 с.

63. Оробинский, В.М. Абразивные методы обработки и их оптимизация : монография / В. М. Оробинский. - 2. изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 2000. - 312 с.

64. Паньков, Л.А. Ленточное шлифование высокопрочных материалов / Л.А. Паньков, Н.В. Костин. М.: Машиностроение, 1978. – 126 с.

65. Пат. № 89012, Российская Федерация, МПК7 В 23 В 5/00. Станок для обработки бандажей / Шрубченко И.В., Кузнецова И.В., Колобов А.В.,

Шрубченко М.И.; заявитель и патентообладатель: Белгор. Гос. Технол. Ун-т им. В.Г. Шухова. – № 2009101625/22; заявл. 19.01.2009, опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33 – 2 с.

66. Пат. № 97954, Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 В 5/00. Станок для обработки бандажей / Мурыгина Л.В., Шрубченко И.В., Архипова Н.А.; заявитель и патентообладатель: Белгор. Гос. Технол. Ун-т им. В.Г. Шухова. – № 2010119624/02; заявл. 17.05.2010, опубл. 27.09.2010, Бюл. № 27 – 3 с.

67. Пат. № 109688, Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 24 В 23/00. Устройство для обработки крупногабаритных цилиндрических поверхностей / Каспаров А.В., Шрубченко С. Н.; заявитель и патентообладатель: Каспаров А.В., Шрубченко С. Н. – № 2011121078/02; заявл. 25.05.2011, опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30 – 2 с.

68. Пат. № 162422, Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> 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.

69. Пат. № 166871, Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> 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.

70. Пат. № 169072, Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> 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.

71. Пат. № 2364487, Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 24 В 23/08. Станок для обработки цилиндрических деталей / Гончаров А. Б., Одинцов Л. Г., Тулинов А.Б.; заявитель и патентообладатель: ЗАО ММК «МОСИНТРАСТ» – № 2007141060/02; заявл. 08.11.2007, опубл. : 20.08.2009, Бюл. № 23 – 11 с.

72. Пелипенко, Н.А. Математическая модель формообразования цилиндрической поверхности при безрамной технологии обработки крупногабаритных деталей / Н.А. Пелипенко // Вестник машиностроения. – 1988. – №5. – С.40–41.

73. Пелипенко, Н.А. Точность опознавания формы крупногабаритных деталей при аппроксимации поверхности степенным полиномом / Н.А. Пелипенко, А.А. Погонин, А.И. Полуниин, Ю.М. Смоляго и др. //Сб. науч. тр.

Физико-математические методы в строительном материаловедении. 1986. С. 190-194.

74. Пелипенко, Н.А. Описание поведения центра бандажа с помощью математического моделирования / Н.А. Пелипенко, С.Н. Санин // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 1. С. 46-48.

75. Пинегин, С.В. Контактная прочность в машинах / С. В. Пинегин, д-р техн. наук проф. - Москва : Машиностроение, 1965. - 192 с.

76. Пинегин, С.В. Контактная прочность и сопротивление качению / С. В. Пинегин, д-р техн. наук проф. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 1969. - 243 с.

77. Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. - 2-е изд. - М. : Мир, 1985. - 694 с.

78. Платонов, В.С. Скоростные методы ремонта вращающихся цементных печей / В.С. Платонов, М.Д. Буренков, В.В. Дмитриев ; М-во пром-сти строит. материалов СССР. Глав. упр. цементной пром-сти. Всесоюз. трест "Союзремонт". - Москва : Стройиздат, 1970. - 127 с.

79. Погонин, А.А. Восстановление точности крупногабаритных деталей с использованием приставных станочных модулей: монография / А.А. Погонин. - Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2004. - 190 с.

80. Погонин, А.А. Концепция проектирования встраиваемых станочных модулей для мобильной технологии восстановления / А.А. Погонин, И.В. Шрубченко // Горные машины и автоматика. 2004. №7. С. 37-39.

81. Погонин, А.А. Особенности ремонтно-восстановительной обработки бандажей и роликов технологических барабанов / А.А. Погонин, В.Н. Бондаренко, С.Н. Санин // Химическая техника - 2004. - №11. - С. 30-32.

82. Погонин, А.А. Стойкость инструмента при обработке бандажей вращающихся печей / А.А. Погонин, В.И. Рязанов // Сб. трудов БТИСМ Модернизация оборудования предприятий по производству строительных материалов. - Белгород, 1988. С. 52-55.

83. Посашков, В.С. Моделирование отклонений формы цилиндрической поверхности [Электронный ресурс] / В.С. Посашков, М.С. Гончаров // сб. докл. Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2015. С. 839-842.

84. Прохоров, А.Ф. Наладка и эксплуатация бесцентровых шлифовальных станков / А.Ф. Прохоров, К.Н. Константинов, Л.П. Волков. - М.: Машиностроение, 1967. - 191 с.

85. Росс, Д. Х. Залог надежности печи - в ее стабильной работе / Д. Х. Росс // Цемент и его применение. - 2015. - № 2. - С. 108-110.



86. Рояк, Д.А. Исследование деформированного состояния корпусов вращающихся печей / Д.А. Рояк., М.Ф. Михалев, А.Ф. Мурзин // Тр. Гипроцемента. — 1969. — Вып. 34. — С. 126–174.

87. Рубцов, А.Н. Математическое моделирование в машиностроении / А.Н. Рубцов, А.А. Погонин, Н.А. Пелипенко // МИСИ-БТИСМ, 1987. 105 с.

88. Руководство по выверке технологического оборудования цементных заводов / Главвостокцемент, Трест "Востокспецремонт". - Новосибирск : Б. и., 1983. - 119 с.

89. Рыковский, Б.П. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом / Б.П. Рыковский, В.А. Смирнов, Г.М. Щетинин. - М. : Машиностроение, 1985. - 151 с.

90. Санин, С.Н. Новые технологии восстановительной обработки поверхностей катания крупногабаритных деталей без их демонтажа: Монография / С.Н. Санин. - Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2009. - 86 с.

91. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / М.Я. Сапожников. – М.: Высшая школа, 1971. – 321 с.

92. 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.

93. 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.

94. 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.

95. Силенок, С.Г. Механическое оборудование для производства вяжущих строительных материалов / С.Г. Силенок, Ю.С. Гризак, В.Д. Лысенко, Д.Е. Нефедов. - Москва : Машиностроение, 1969. - 391 с.

96. Силин, С.С. Оптимизация технологии глубинного шлифования / С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков. М.: Машиностроение, 1989. - 120 с.
97. Справочник машиностроителя: В 6 т. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Машгиз, 1955-1956. - Т. 3 / Л. Е. Андреева, В. Л. Бидерман, С. В. Бояршинов кандидаты техн. наук и др. ; Глав. ред. действ. чл. АН УССР С. В. Серенсен. - 1955. - 564 с.
98. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2/Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
99. Стативко, А.А. Формообразование бандажей вращающихся печей при их бесцентровой обработке: автореферат дис. кандидата технических наук : 05.02.13, 05.02.08 / А.А. Стативко. Белгород. гос. технол. акад. строит. материалов (БелГТАСМ). - Белгород, 2000. - 19 с.
100. Старков, В.К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
101. Стратиевский, И.Х. Абразивная обработка: справочник / И.Х. Стратиевский, В.Г. Юрьев, Ю.М. Зубарев. - Москва : Машиностроение, 2010. - 352 с.
102. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. - М. : Машиностроение, 2000. – 317 с.
103. Технические указания на монтаж вращающихся печей и барабанных сушилок. СН 208-62: Изд. офиц. : Утв. 10/III 1962 г. : [Срок введения 1 июля 1962 г.] / Гос. ком. Совета Министров СССР по делам строительства. - Москва : Госстройиздат, 1962. - 23 с.
104. ТОО «Ремонтно-электромеханический завод» Восстановление бандажей и роликов [Электронный ресурс]. URL: <http://remz.kz/> (20.02.2019).
105. Ушаков, Р.Н. Определение формы поверхностей крупногабаритных деталей, имеющих бесцентровую схему базирования / Р.Н. Ушаков, А.А. Погонин, И.В. Шрубченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2005. №11. С.421–423.
106. Федоренко, М.А. Исследование обеспечения необходимой шероховатости поверхности крупногабаритных вращающихся деталей приставными станочными модулями / М.А. Федоренко, Т.М. Федоренко, Ю.А. Бондаренко // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2008. № 2. С. 35-38.
107. Филимонов, Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 248 с.
108. Филькин, В.П. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования / В.П. Филькин, И.Б. Колтунов. - М.: Машиностроение, 1971 - 204 с.
109. «ФУТЛАЙН» Восстановление оборудования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.futline.kz/taxonomy/term/34> (20.02.2019).

110. Хартман К., Лецки Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – Мир, 1977. – 522 с.
111. Хватов, Б.Н. Построение номограмм режимов ленточного шлифования на основе математического планирования эксперимента: метод. указ. / сост. Б.Н. Хватов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007 – 32 с.
112. Хуртасенко, А.В. Технология восстановительной обработки крупногабаритных деталей с использованием методов активного контроля: монография / А.В. Хуртасенко. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 144 с.
113. Чепчуров, М.С. Обработка деталей с неравномерным по структуре материалом припуска /М.С. Чепчуров//Технология машиностроения. -2008. -№10. -С. 12 -14.
114. Чепчуров, М.С. Проблемы обработки деталей с неравномерным по структуре материалом припуска / М.С. Чепчуров//Технология машиностроения. - 2008. -№7. -С. 11 -14.
115. Чунихин, К.С. Контактные проявления ошибок формы [Электронный ресурс] / М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // сб. докл. Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2015. С. 1570-1574.
116. Шарاپов, Р.Р. Специальное оборудование заводов по производству цемента: учеб. пособие / Р.Р. Шарাপов. - Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2006. - 143 с.
117. Шелковая, Н.Ю. Оценка напряженно-деформированного состояния упругой направляющей [Электронный ресурс] / Н.Ю. Шелковая, М.С. Гончаров // сб. докл. Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2016. С. 961-964.
118. Шрубченко, И.В. Идентификация траекторий бандажа с ошибками формы при бесцентровой схеме базирования / И.В. Шрубченко, А.В. Хуртасенко, М.С. Гончаров // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Выпуск XV : межвузовский сборник статей. - Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2016. - С. 278-284.
119. Шрубченко, И.В. Исследование изменений напряженно-деформированного состояния бандажей при их реконструкции из плавающего типа во вварной / И.В. Шрубченко, Л.В. Мурыгина, В.Ю. Рыбалко, Н.А. Щетинин // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. - 2013. - № 5. - С. 91-96.
120. Шрубченко, И.В. Исследование характеристик пятна контакта поверхностей качения технологических барабанов / И. В. Шрубченко, И.И. Кузнецова // "Механики – XXI веку": сб. докл. V межрегиональной научно-

технической конференции с международным участием.– Братск, 2006. – С. 242-245.

121. Шрубченко, И.В. К вопросу о биении бандажа с погрешностью формы поверхности качения [Электронный ресурс] / И.В. Шрубченко, А.В. Хуртасенко, М.С. Гончаров, А.А. Щендрыгин // Научные технологии и инновации: Междунар. науч.-практ. конф. Белгород, 2016. - Ч. 10. - С. 93-97.

122. Шрубченко, И.В. К исследованию режимов ленточного шлифования поверхностей качения бандажей и роликов технологических барабанов / И.В. Шрубченко, В.Ю. Рыбалко, Л.В. Мурыгина, Н.А. Щетинин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 77-81.

123. 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.

124. 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

125. Шрубченко, И.В. Математическая модель процесса обточки бандажа цементной печи / И.В. Шрубченко, А.И. Полуниин // Математическое моделирование в технологии строительных материалов: сб. науч. тр. – Белгород, 1992. – С. 43-47.

126. Шрубченко, И.В. Определение касательной подачи при шлифовании бандажей с ошибками формы [Электронный ресурс] / И.В. Шрубченко, А.В. Хуртасенко, М.С. Гончаров, В.А. Хуртасенко // Научные технологии и инновации: Междунар. науч.-практ. конф. Белгород, 2016. - Ч. 10. - С. 87-92.

127. Шрубченко, И.В. Определение размерного износа инструмента при обработке поверхностей качения опор технологических барабанов/ И.В. Шрубченко, А.В. Колобов, И.И. Кузнецова, М.И. Шрубченко // СТИН. - 2006. - №10. - С. 22-23.

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

129. Шрубченко, И.В. Повышение технологичности обработки крупногабаритных составных бандажей за счет минимизации необходимого припуска: монография / И. В. Шрубченко, И. И. Кузнецова. - Белгород : БГТУ, 2012. - 156 с.

130. Шрубченко, И.В. Применение математического моделирования для выбора параметров элементов самоустанавливающегося суппорта / И.В. Шрубченко, А.И. Полунин // Системотехника в промышленности строительных материалов: сб. науч. тр. – Белгород, 1992. – С. 8-16.

131. Шрубченко, И.В. Программа для моделирования процесса обработки поверхностей закрылка банджа при его реконструкции во вварной тип / И.В. Шрубченко, В.С. Богданов, Л.В. Мурыгина, Н.А. Щетинин, М.С. Гончаров // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. - 2015. - № 2. - С. 72-77.

132. Шрубченко, И.В. Способы обработки поверхностей качения опор технологических барабанов с использованием мобильных технологий и оборудования: монография / И.В. Шрубченко. - Белгород : Изд-во БГТУ, 2006. - 284 с.

133. Шрубченко, И.В. Технологический процесс реконструкции бандажей типа «П» в тип «В» / И.В. Шрубченко, Л.В. Мурыгина, Н.А.Щетинин // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. - 2014. - № 1. - С. 73-77.

134. Шрубченко, И.В. Технологическое обеспечение точности базовых поверхностей при сборке опор технологических барабанов: монография / И. В. Шрубченко, М. И. Шрубченко. - Белгород : Изд-во БГТУ, 2010. - 116 с.

135. Шрубченко, И. В. Технологическое обеспечение условий контакта деталей опор технологических барабанов при их сборке и эксплуатации: монография / И. В. Шрубченко, А. В. Хуртасенко, А. В. Колобов. - Белгород : Изд-во БГТУ, 2015. - 193 с.

136. Щендрыгин, А.А. Повышение жесткости направляющей мобильного станка / А.А. Щендрыгин, М.С. Гончаров, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко // сб. докл. Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2015. С. 1599-1604.

137. Щетинин Н.А. К определению оптимальной формы кольцевых проточек на торцах бандажей при их реконструкции / Н.А. Щетинин, И.В. Шрубченко, В.С. Богданов, Л.В. Мурыгина, М.С. Гончаров // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-1. С. 85-89.

138. Юнусов, Ф. С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием / Ф. С. Юнусов. - М. : Машиностроение, 1987. - 245 с.

139. Якимов, А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. М.: "Машиностроение", 1975. 176 с.

140. Evans & Daniels Inc. Available at: [http://www.evansanddaniels.com/welcome\\_files/Page344.html](http://www.evansanddaniels.com/welcome_files/Page344.html) (accessed 20 February 2019).

141. FLSmidth. Available at: <http://www.flsmidth.com/ru-RU/Industries/Cement/Services/On-site+services/Kiln/On-site+services+for+kilns> (accessed 20 February 2019).

142. GRC. Фрезеровка и шлифовка портативными станками на выезде [Электронный ресурс]. URL: <https://www.1grc.ru/portable-milling> (20.02.2019).

143. Maskinering AS. Available at: <http://maskineringas.no/MobilMaskinering> (accessed 20 February 2019).

144. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ: учебное пособие для студентов технических вузов / Гончаров П. С. [и др.]. - Москва : ДМК Пресс, 2012. - 503 с.

145. Ozek Makina. Available at: <http://www.rotarykiln.net/> (accessed 20 February 2019).

146. Phillips Kiln Services. Available at: <http://www.pkse.co.uk/> (accessed 20 February 2019).

147. Rotary Kiln & Dryer. Available at: <http://www.rotarykilnanddryer.com/main.html> (accessed 20 February 2019).

148. Rotary Kiln Services Australasia. Available at: <http://www.kilnservices.com.au/our-services/field-machining/> (accessed 20 February 2019).

149. Rotary service company. Available at: <https://rotaryservicecompany.com/> (accessed 20 February 2019).

150. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Voronkova M.N., Murygina L.V., Optimization of cutting conditions for the processing of bandages of rotary cement kilns at a special stand. World Applied Sciences Journal. 2014. T. 31. № 9. С. 1593-1600.

151. TomTom-Tools. Available at: <http://tomtomtools.com/> (accessed 20 February 2019).

152. ThyssenKrupp AG. Polgrind. Available at: <https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/products-and-services/service/service-product-finder/polgrind/> (accessed 20 February 2019).

### Пример оформления части результатов инспекции вращающейся печи

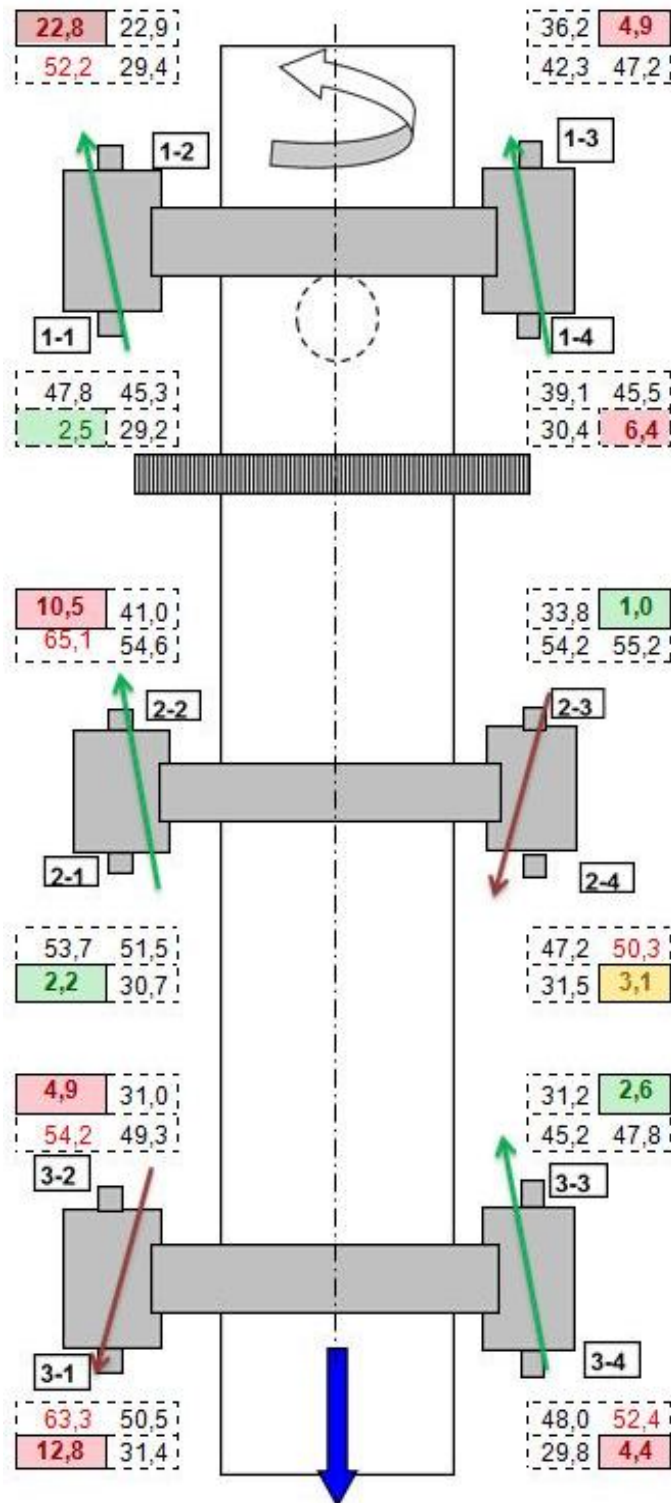


Рис. П. 1. Обозначения для подшипника 1-2: в первой (слева на право) ячейке второй строки - температура упорной шейки; во второй ячейке - температурой оси; в первой ячейке первой строки - разность температур в ячейках второй строки; во второй ячейке - температура масла. Для подшипников 1-1 и 1-3 та же информация в ячейках расположенных зеркально симметрично относительно ячеек для подшипника 1-2. Аналогично для всех остальных подшипников. Стрелками указаны направления перемещений корпуса печи и смещения опор.

## Результаты моделирования механической обработки профилей бандажа станком с СПК

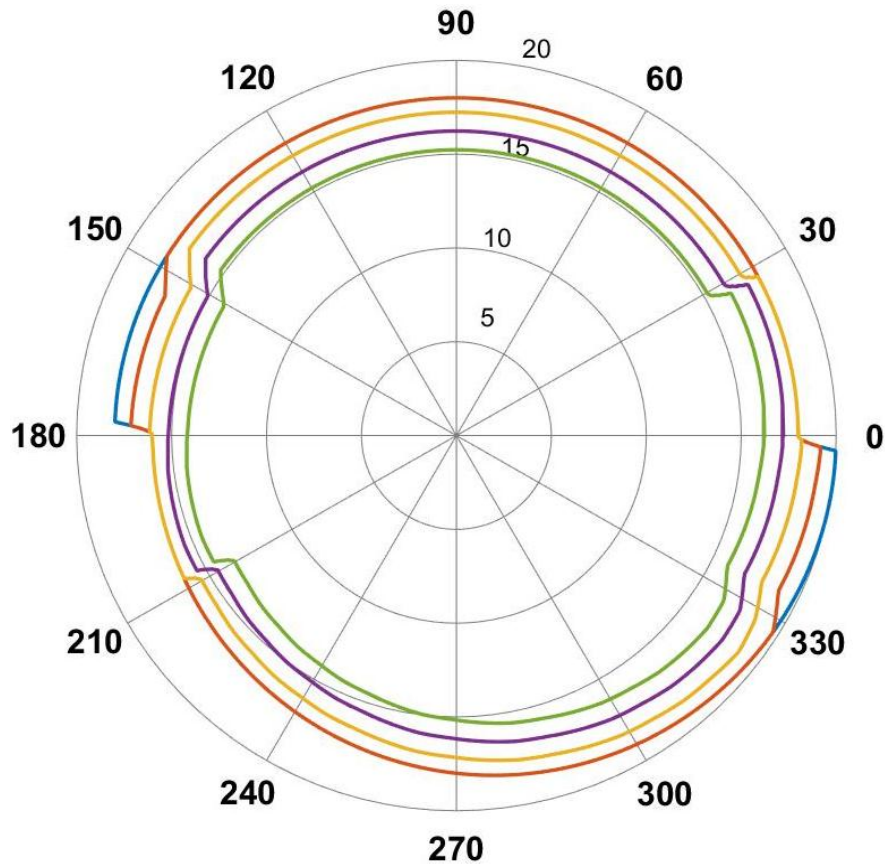


Рис. П.2. Изменение профиля Corner ( $R_{const}=2407$  мм) при моделировании восстановительной обработки с базированием по неизменяемой поверхности (СПК) и  $t=1$  мм;  $W=5$ .

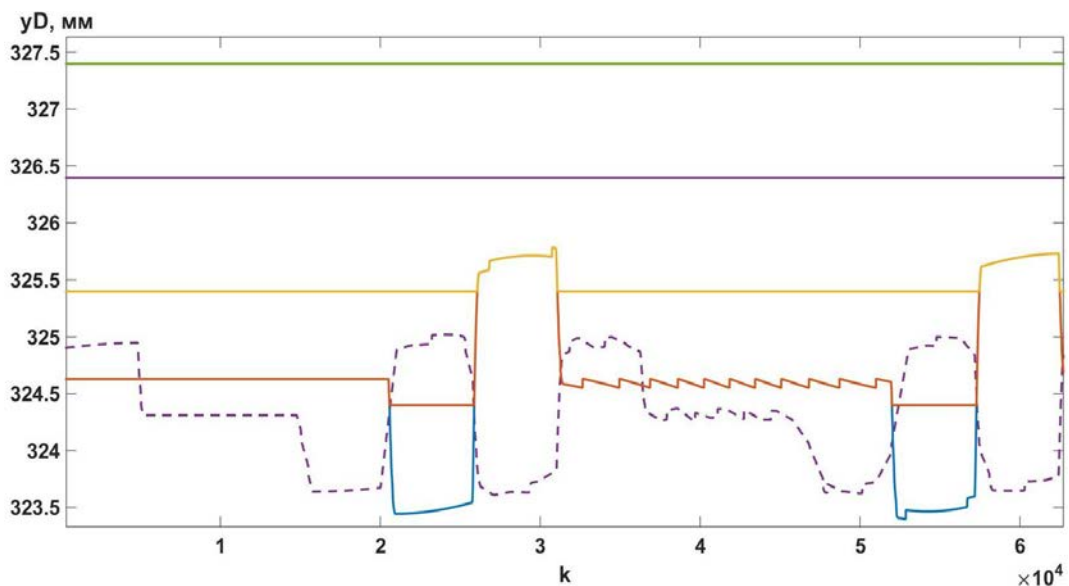


Рис. П.3. Изменение индикаторной диаграммы при моделировании обработки профиля Corner ( $W=4$ ,  $t=1$  мм) с базированием по неизменяемой поверхности: сплошные линии - диаграммы полученные на соответствующем проходе; штриховой линией обозначена полученная в программе *Motion* диаграмма профиля (для  $W=5$ ) с минимальным  $EFK=$  мм



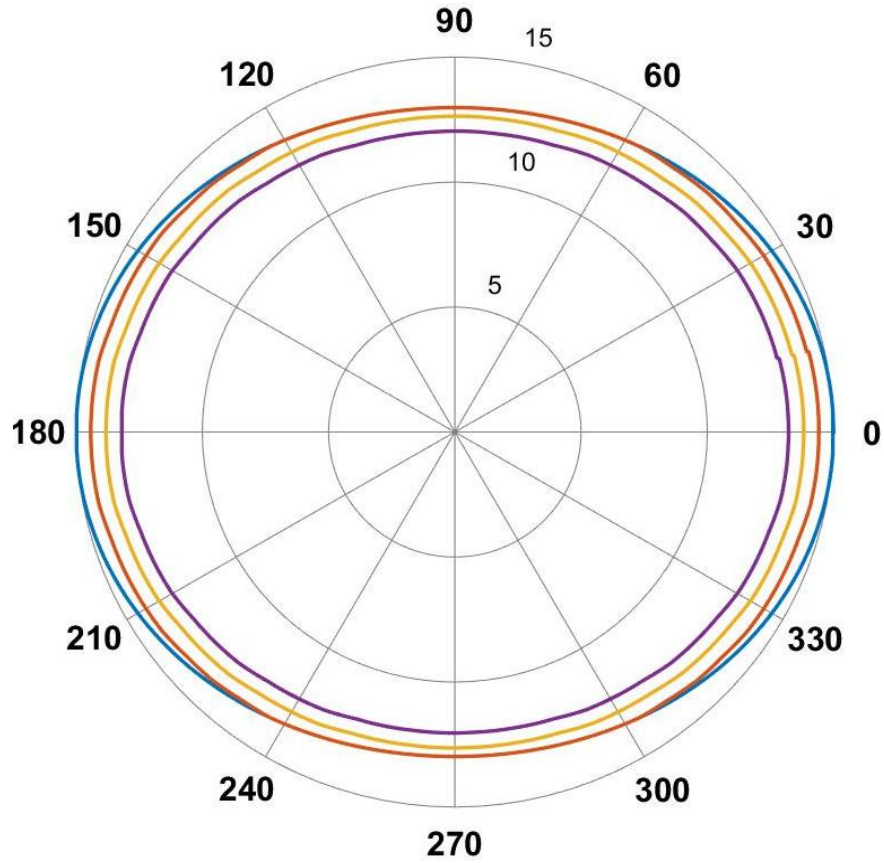


Рис. П.4. Изменение профиля Cassini ( $R_{const}=2410$  мм) при моделировании восстановительной обработки с базированием по неизменяемой поверхности (СПК) и  $t=0,6$  мм;  $W=4$ .

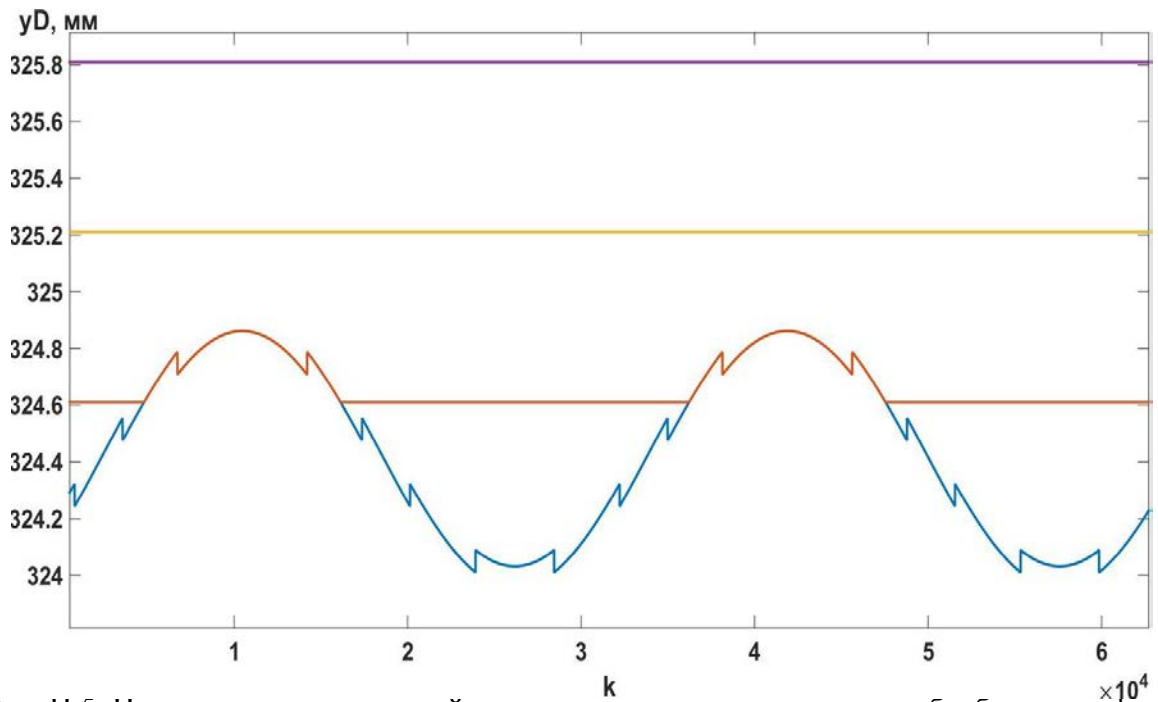


Рис. П.5. Изменение индикаторной диаграммы при моделировании обработки профиля Cassini ( $W=4$ ,  $t=0,6$  мм) с базированием по неизменяемой поверхности (СПК).

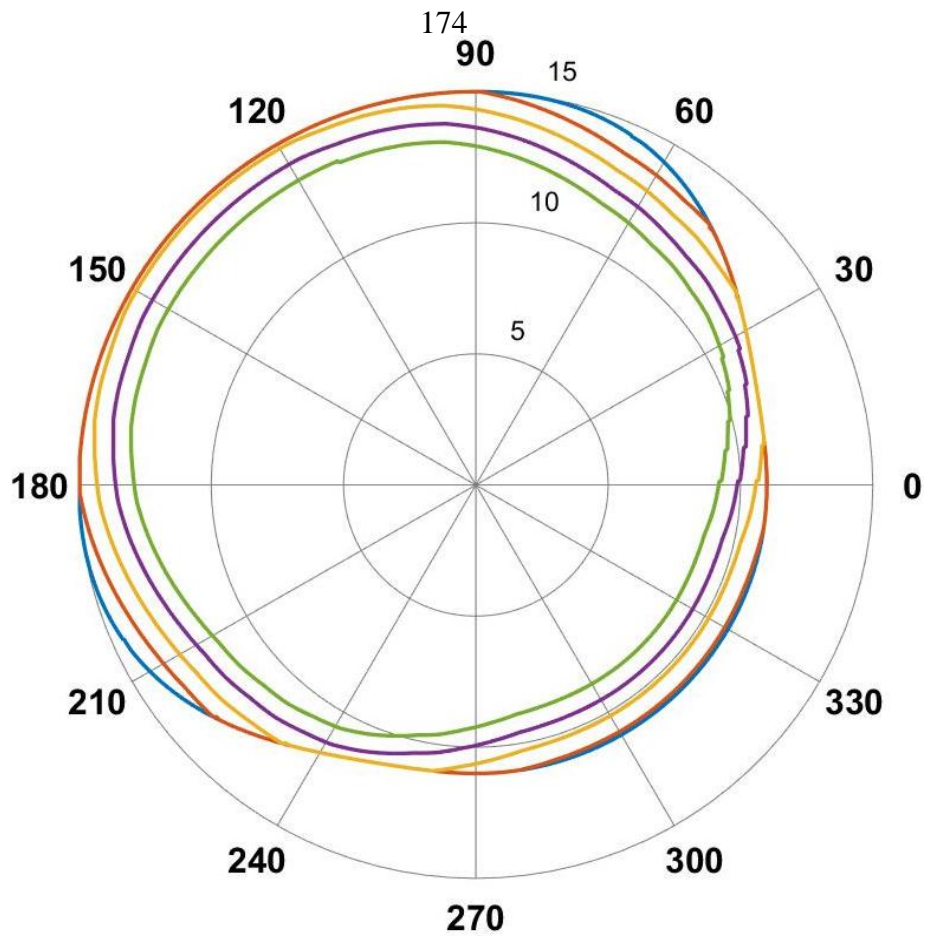


Рис. П.6. Изменение профиля Сам ( $R_{const}=2410$  мм) при моделировании восстановительной обработки с базированием по неизменяемой поверхности (СПК) и  $t=0,7$  мм;  $W=5$ .

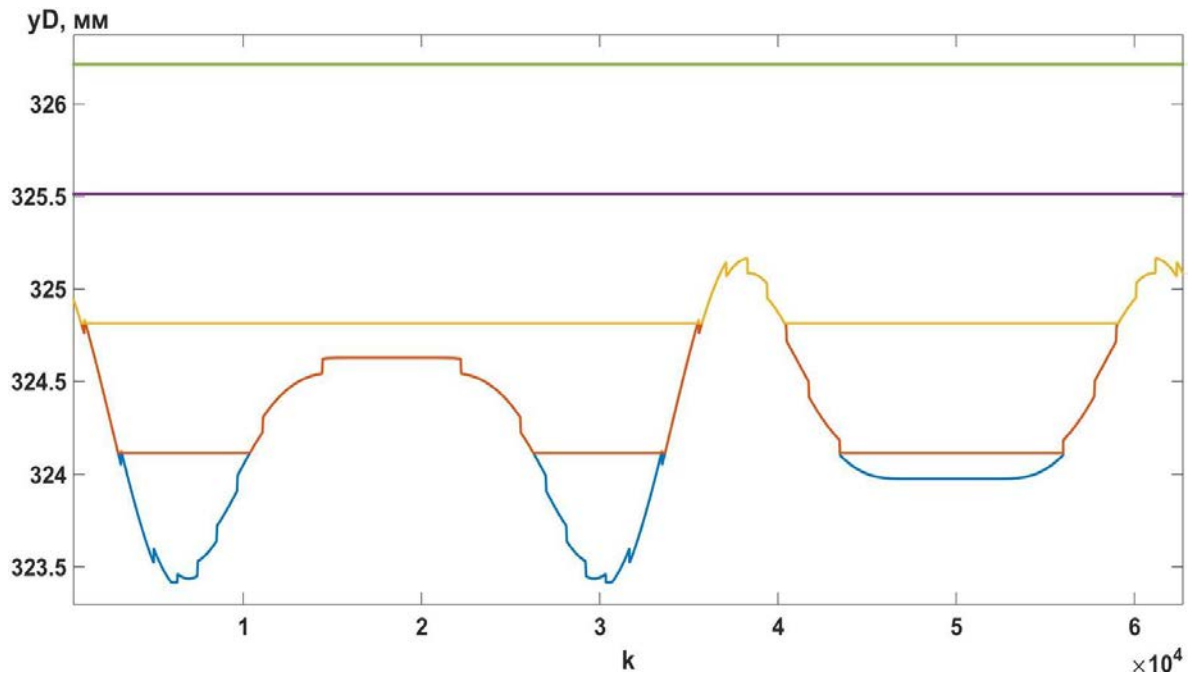


Рис. П.7. Изменение индикаторной диаграммы при моделировании обработки профиля Сам ( $W=5$ ,  $t=0,7$  мм) СПК с базированием по неизменяемой поверхности (СПК).

## Результаты моделирования механической обработки профилей бандажа станком с УВС-М и ДСС

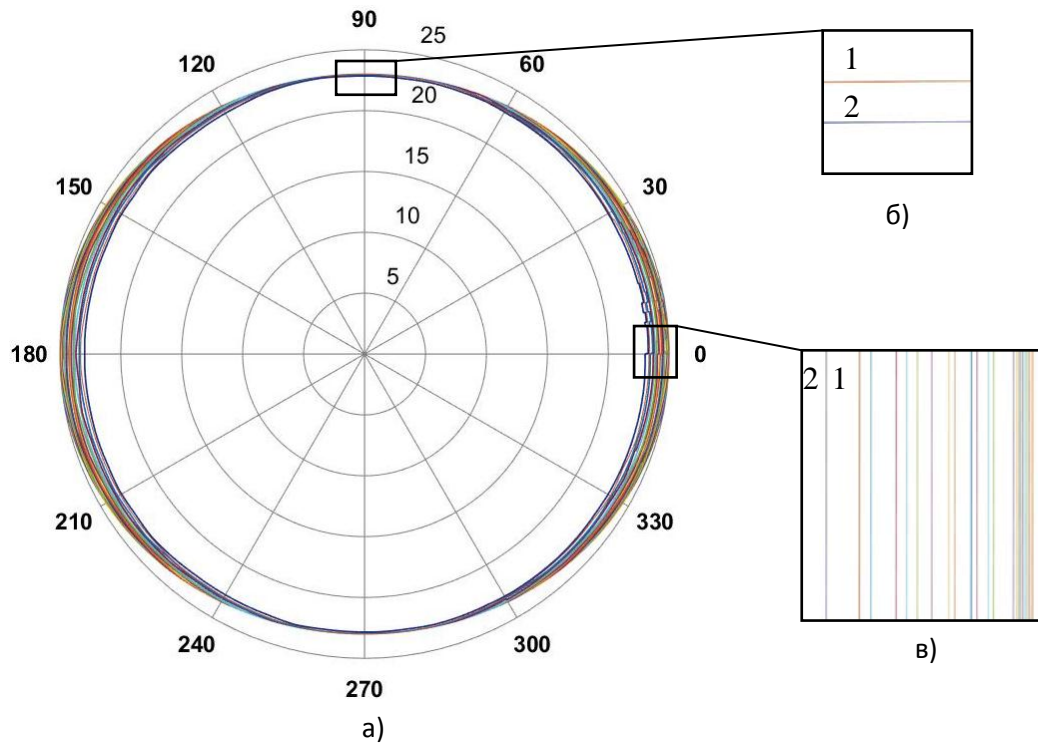


Рис. П.8. Результаты моделирования механической обработки станками УВС-М и СПК: а - изменения профиля Cassini (при  $W=24$ ,  $t=0,05$  мм,  $R_{const}=2400$  мм); б и в - кривые профиля Cassini при  $R_{const}=0$  мм и проходах  $W=23$  и  $W=24$  соответственно 1 и 2.

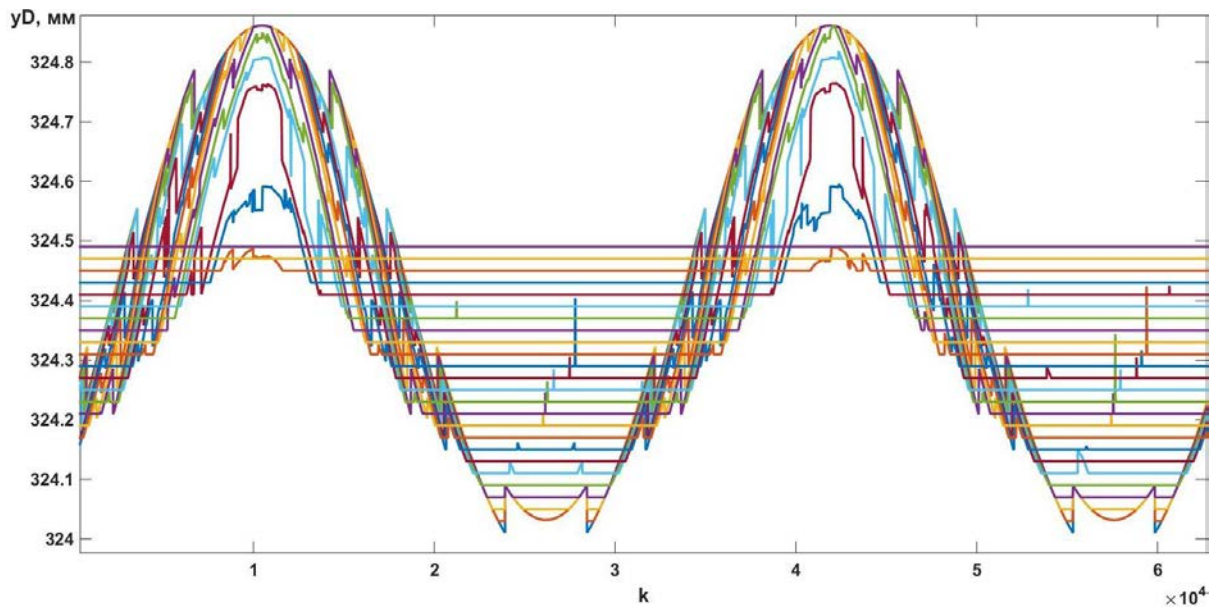


Рис. П.9. Изменение индикаторной диаграммы при моделировании обработки профиля Cassini ( $W=24$ ,  $t=0,05$  мм) с базированием по поверхности полученной на предыдущем проходе (УВС-М и СПК).

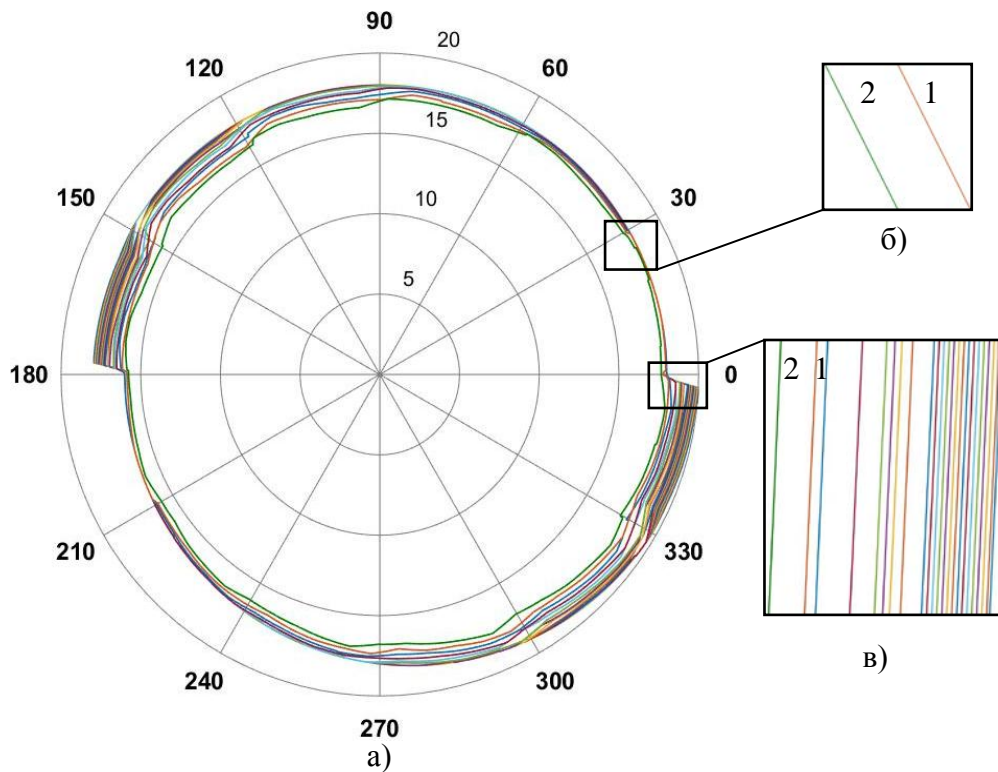


Рис. П.10. Результаты моделирования механической обработки станком с УВС-М и СПК профиля Corner: а - изменение профиля Corner (при  $W=24$ ,  $t=0,05$  мм,  $R_{const}=2407$  мм); б и в - кривые профиля при  $R_{const}=0$  мм и проходах  $W=23$  и  $W=24$  соответственно 1 и 2.

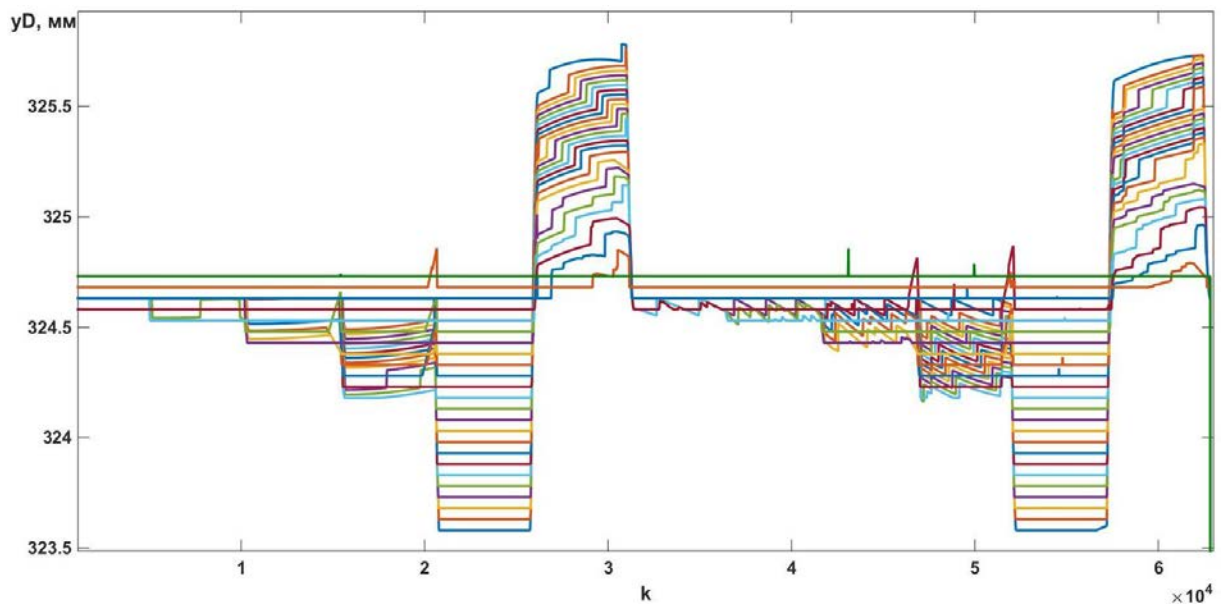


Рис. П.11. Изменение индикаторной диаграммы при моделировании обработки профиля Corner ( $W=24$ ,  $t=0,05$  мм) с базированием по поверхности полученной на предыдущем проходе (УВС-М и СПК).



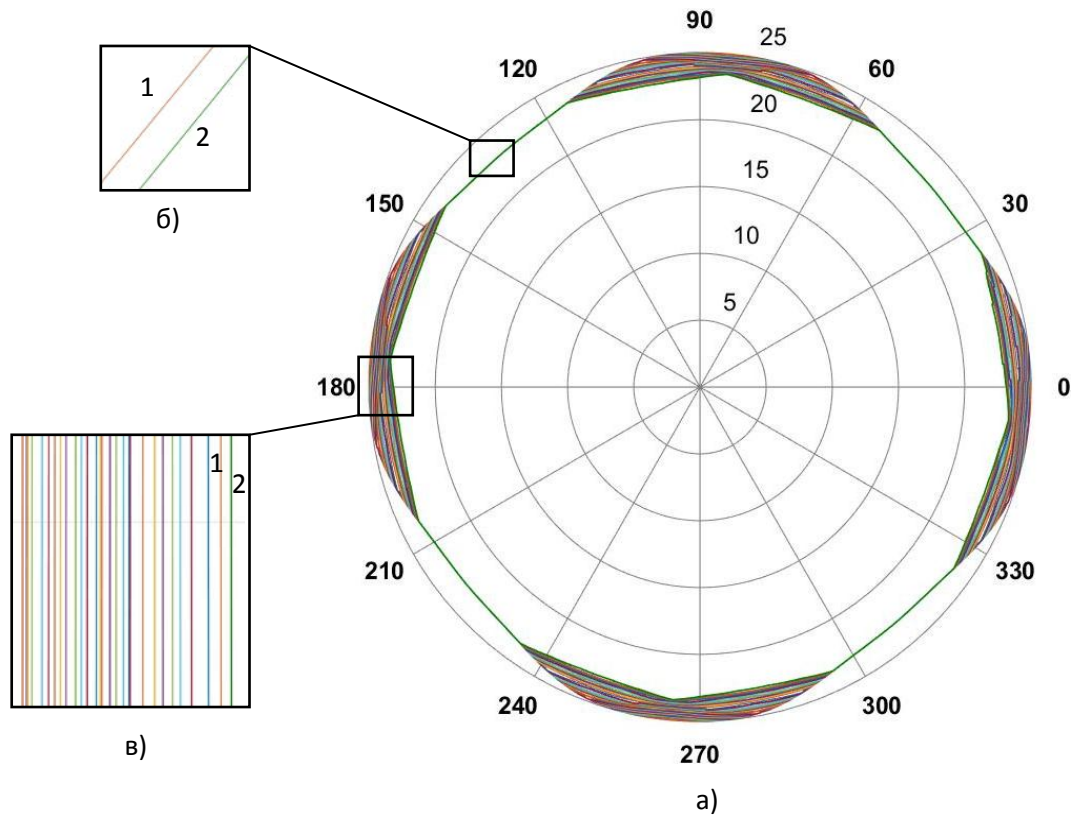


Рис. П.12. Результаты моделирования механической обработки станком с УВС-М и СПК профиля Camomile: а - изменение профиля Camomile (при  $W=30$ ,  $t=0,05$  мм,  $R_{const}=2410$  мм); б и в - кривые профиля при  $R_{const}=0$  мм и проходах  $W=29$  и  $W=30$  соответственно 1 и 2.

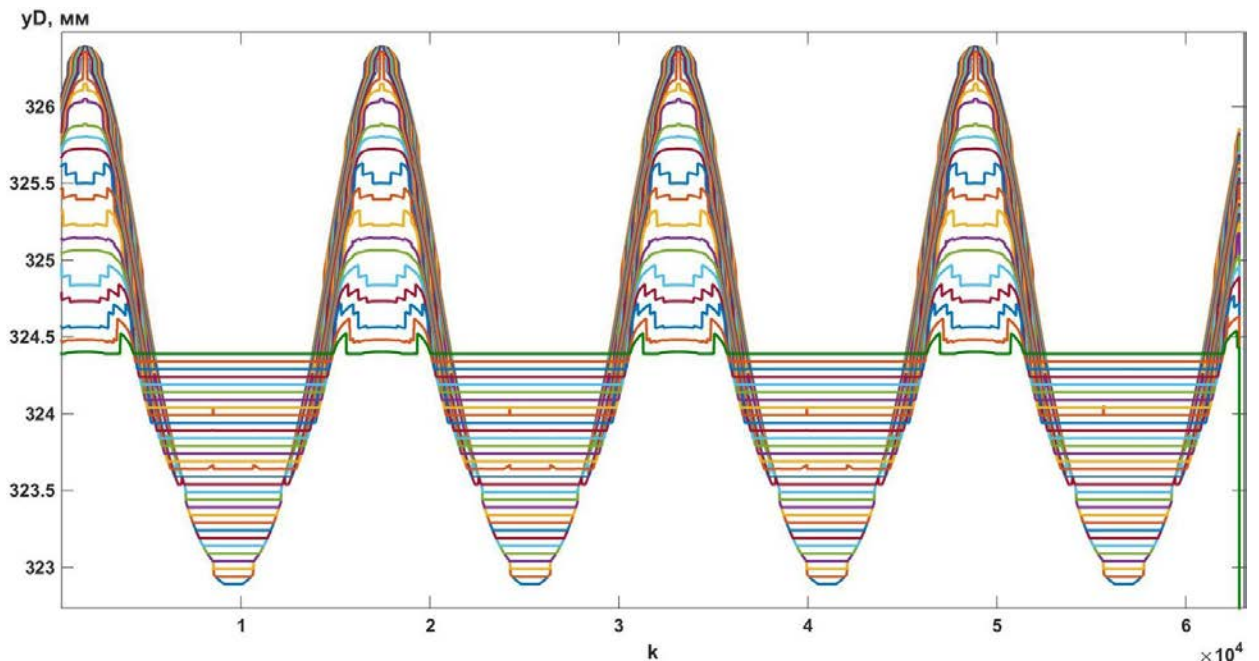


Рис. П.13. Изменение индикаторной диаграммы при моделировании обработки профиля Camomile ( $W=30$ ,  $t=0,05$  мм) с базированием по поверхности полученной на предыдущем проходе (УВС-М и СПК).

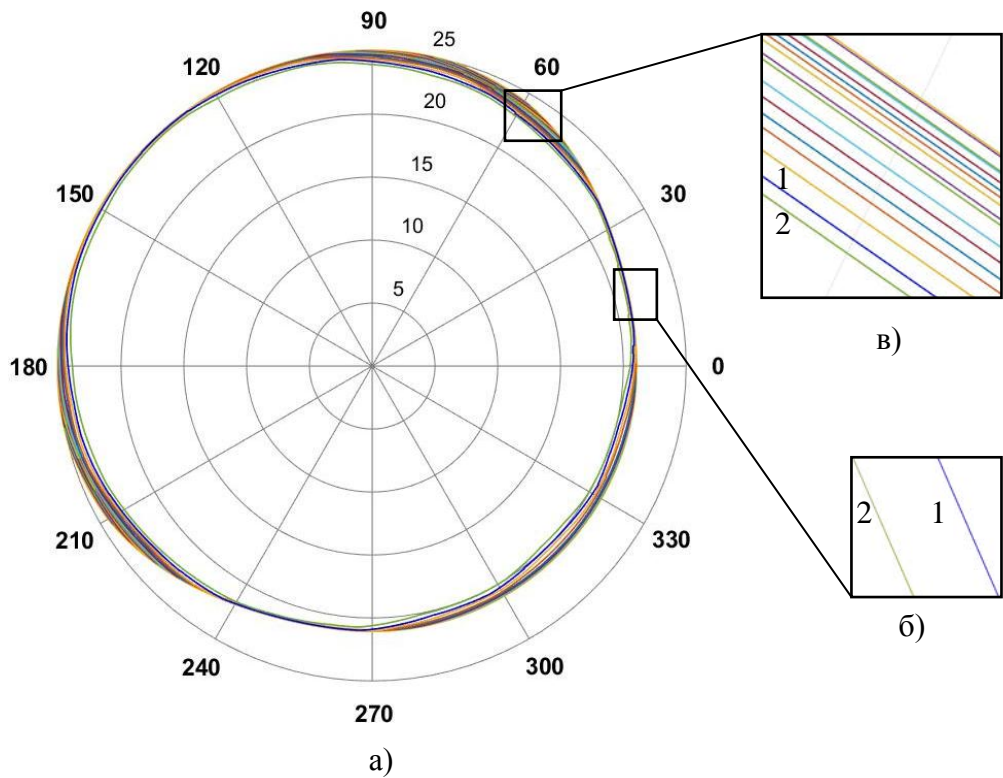


Рис. П.14. Результаты моделирования механической обработки станками ДСС: а - изменения профиля Сам (при  $W=19$ ,  $t=0,05$  мм,  $R_{const}=2400$  мм); б и в - кривые профиля Сам при  $R_{const}=0$  мм и проходах  $W=18$  и  $W=19$  соответственно 1 и 2.

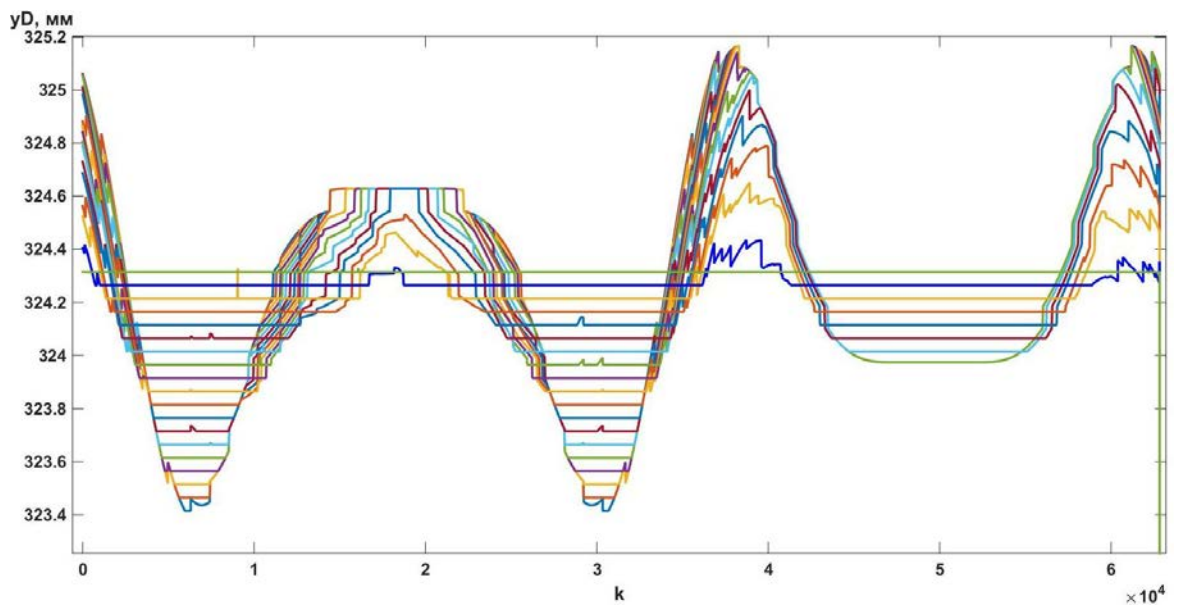


Рис. П.15. Изменение индикаторной диаграммы при обработке профиля Сам ДСС ( $W=19$ ,  $t=0,05$  мм)

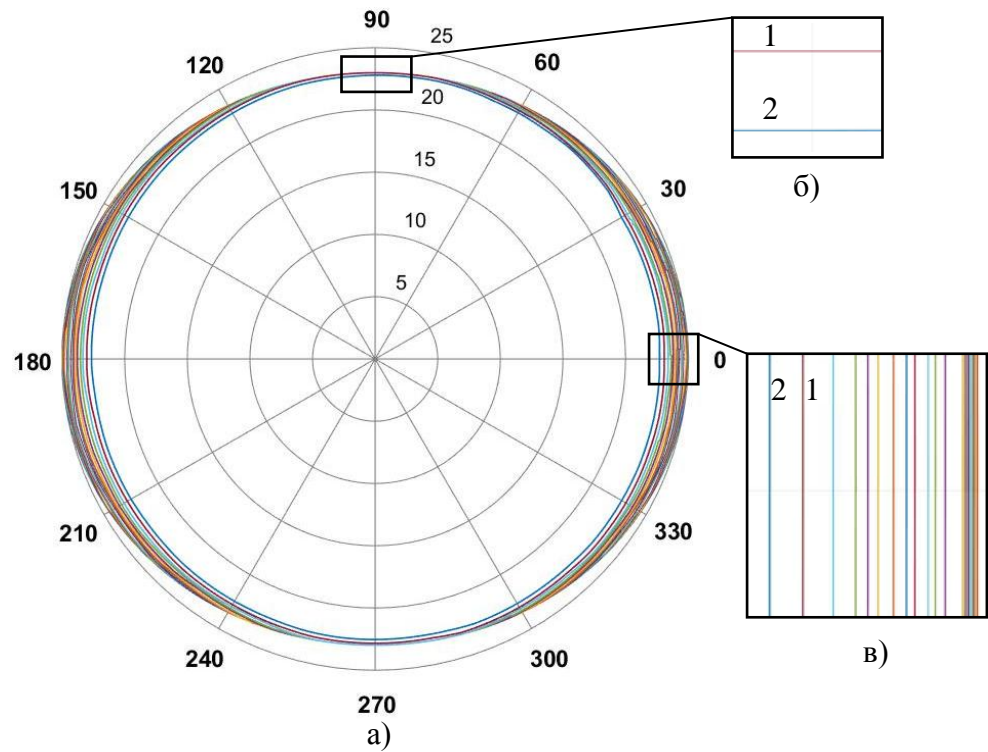


Рис. П.16. Результаты моделирования механической обработки станками ДСС: а - изменения профиля Cassini (при  $W=22$ ,  $t=0,02$  мм,  $R_{const}=2400$  мм); б и в - кривые профиля Cassini при  $R_{const}=0$  мм и проходах  $W=21$  и  $W=22$  соответственно 1 и 2.

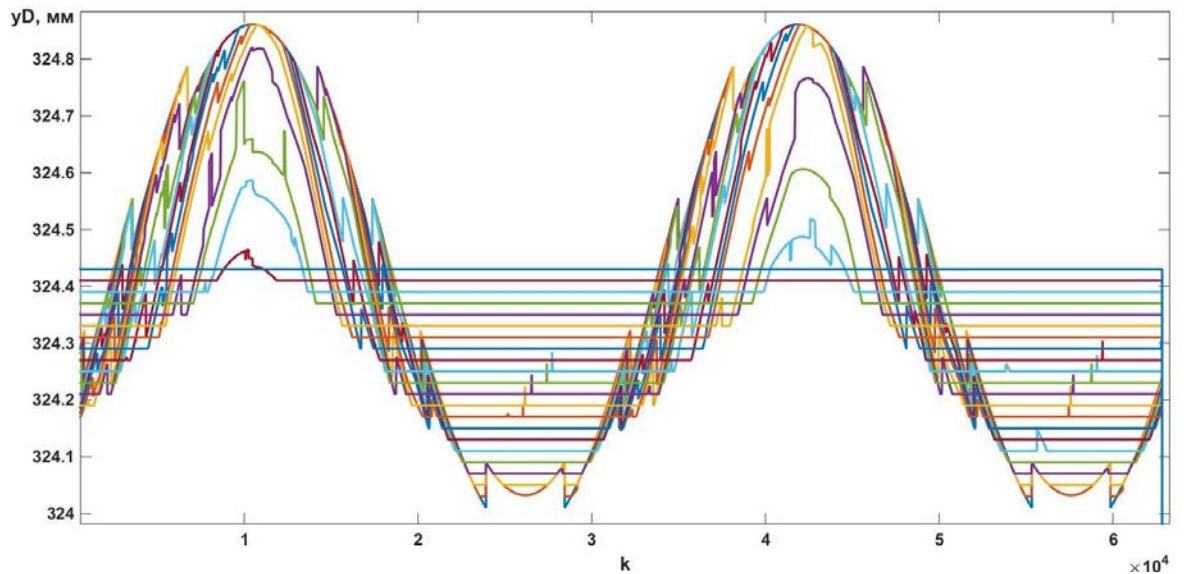


Рис. П.17. Изменение индикаторной диаграммы при обработке профиля Cassini ( $W=22$ ,  $t=0,02$  мм) ДСС.

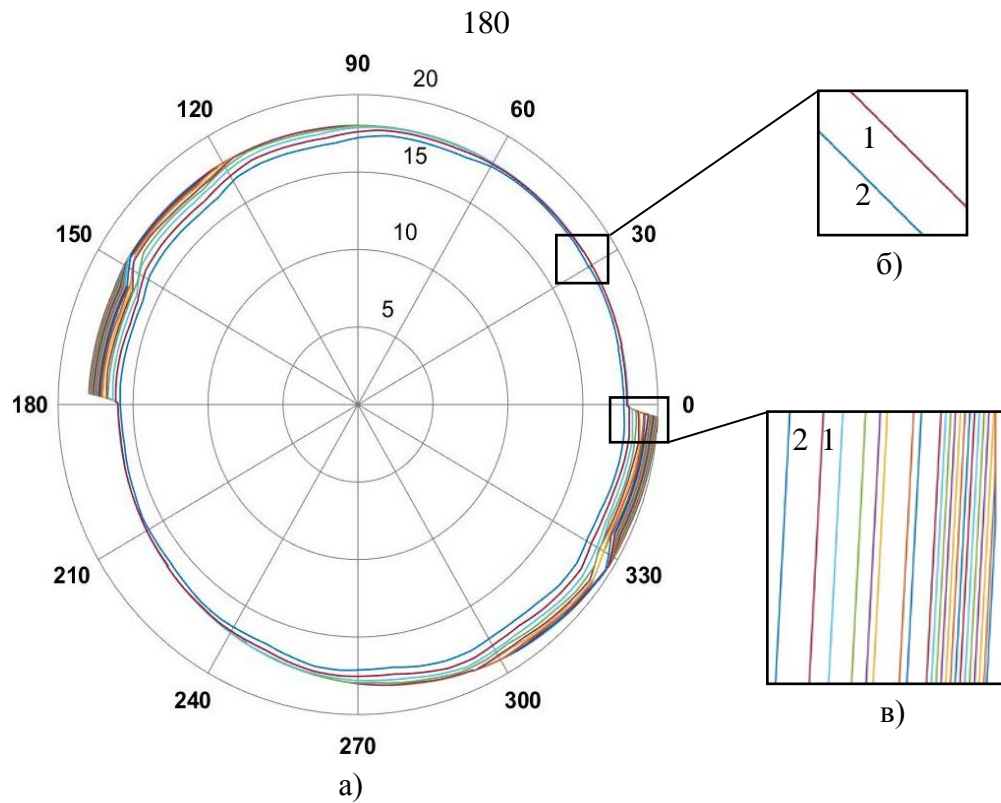


Рис. П.18. Результаты моделирования механической обработки станком с ДСС профиля Corner: а - изменение профиля Corner (при  $W=22$ ,  $t=0,05$  мм,  $R_{const}=2407$  мм); б и в - кривые профиля при  $R_{const}=0$  мм и проходах  $W=21$  и  $W=22$  соответственно 1 и 2.

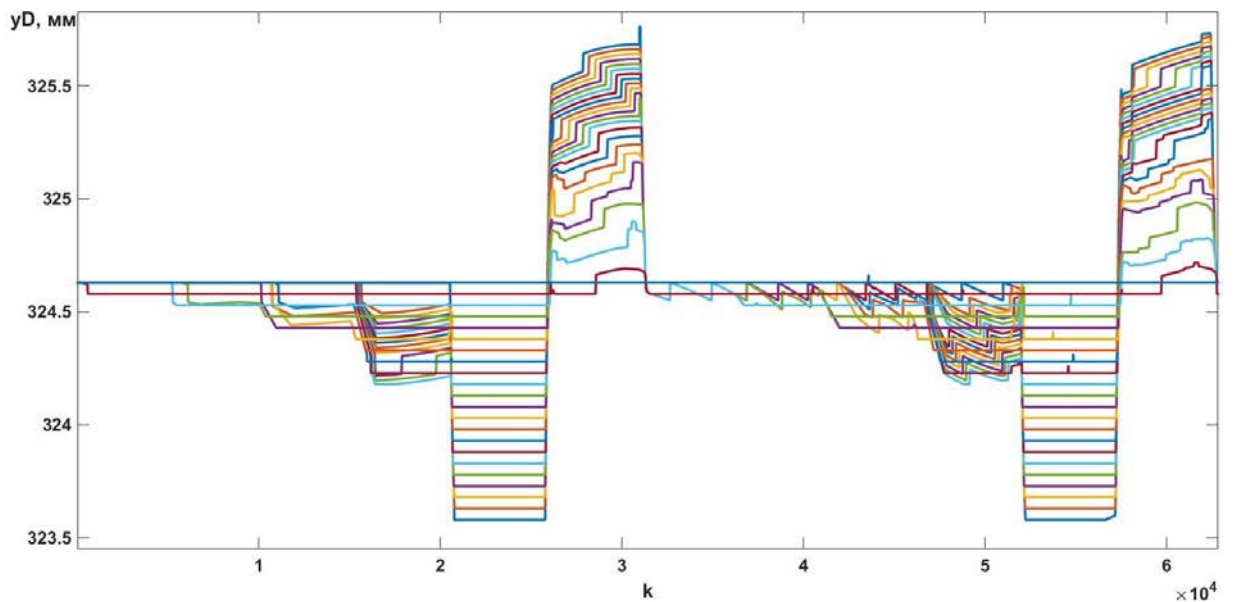


Рис. П.19. Изменение индикаторной диаграммы при обработке профиля Corner ДСС.



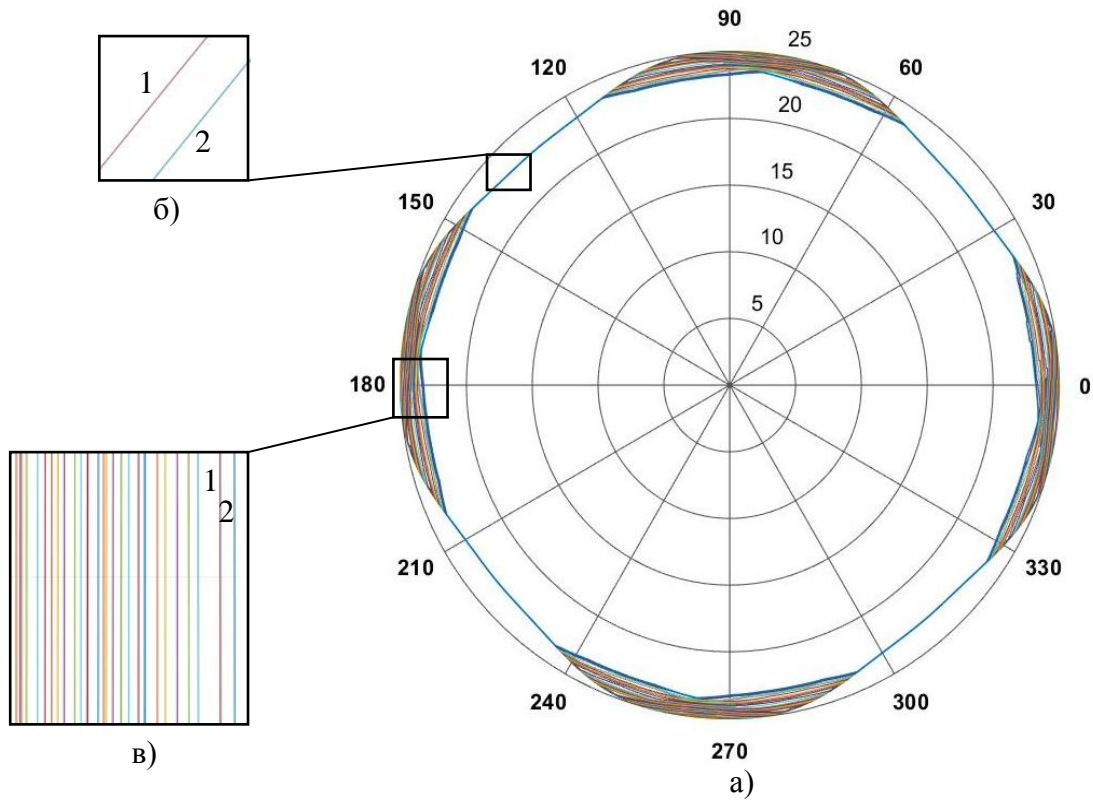


Рис. П.20. Результаты моделирования механической обработки станком с ДСС профиля Camomile: а - изменение профиля Camomile (при  $W=28$ ,  $t=0,05$  мм,  $R_{const}=2410$  мм); б и в - кривые профиля при  $R_{const}=0$  мм и проходах  $W=27$  и  $W=28$  соответственно 1 и 2.

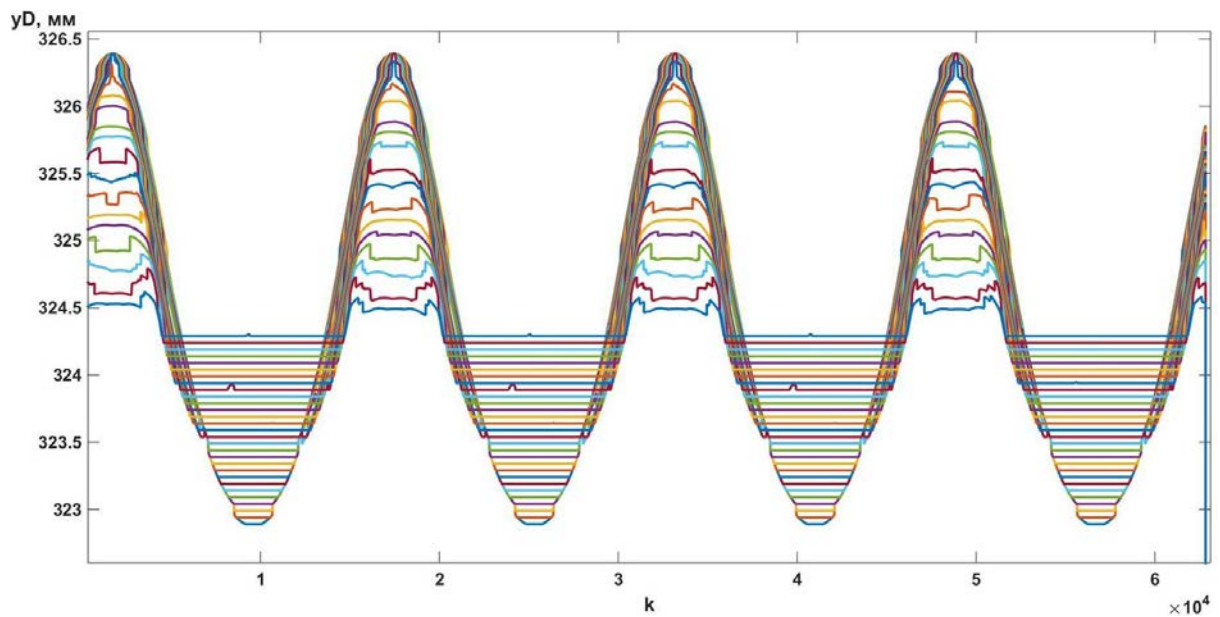


Рис. П.21. Изменение индикаторной диаграммы при обработке профиля Camomile ( $W=28$ ,  $t=0,05$  мм) ДСС.

## Программы моделирования процесса восстановительной обработки поверхностей качения бандажей

### П. 3.1 Roll\_Reg.m.

```

% Adjusting the support roller rotary kiln.
%Программа вычисления параметров положения
%опорного ролика вращающейся печи при горизонтальном смещении
%одной из его опор.
clear all
clc
t1 = fix(clock);%запоминаем время старта
%Начальные условия (не изменяемые)
fi=0;          % полярный угол (рад)
fH = 0.0001;% угловой шаг (рад) полярного угла
kH = 15708; % число положений kH=pi/2/fH
IN1=zeros(kH,6);
IN10=zeros(kH,4);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
aw=3175;          %межосевое расстояние роликоопор, мм
rRL=750;         %радиус ролика, мм
Rb = 2425;       %радиус бандажа, мм
Bb = 100;        %ширина бандажа, мм
aO=2600;        %длина оси ролика между опорами, мм
dOx=5.5;        %смещение дальней опоры, мм
alfa=pi/6;      %угол между осями симметрии бандажа и ролика
HR=(Rb+rRL)*cos(alfa); %высота оси вращения, мм
Lyam=atan(dOx/aO); %угол поворота оси вокруг ближней опоры
%перемещение проекции центра сечения по торцу бандажа
dBx=(aO/2-Bb/2)*tan(Lyam);
%перемещение проекции центра сечения отн оси симметрии бандажа
aXO=aw/2+dBx;
b=rRL; a=(2*rRL)/cos(Lyam)/2;%полуоси эллипса
fi=pi/2;%начальный полярный угол эллипса
for I=1 : kH ;%I-номер положения радиуса вектора
    wq=(a^2*(sin(fi))^2+b^2*(cos(fi))^2)^(1/2);
    ro=(a*b)/wq; %полярный радиус эллипса
    xro=ro*cos(pi-fi);
    yro=ro*sin(pi-fi);
    IN1(I,1) = I; IN1(I,2) = xro; IN1(I,3) = yro;
    IN1(I,4) = ro; IN1(I,5) = fi; IN1(I,6) = (fi*180/pi);
    fi=fi+fH; FLG=0; JJ=1;
end
%сохранение формы эллипса в четверти сечения
KX=dBx*5;
for IX=1 : KX ;
    IxI=IX-0.1; %IxI-перемещение оси сечения к оси бандажа мм
    xO22=aXO-IxI;
    Yb=10000; Yp=0; kx = 1;
    %сравнение положений точек сечения ролика и бандажа
    for kx=1 : kH ;
        DY=Yb - Yp;
        if DY<=0
            %положение с касанием или проникновением достигнуто
            IN10(JJ,1)=IX;IN10(JJ,2)=IxI;IN10(JJ,3)=kx;IN10(JJ,3)=DY;
            JJ=JJ+1;
        end
    end
    if FLG==0
        %первое касание
        sa=IxI;
    end
    FLG=FLG+1;
    end %цикл for (Yb - Yp) > 0
    Xp = IN1(kx,2); Yp = IN1(kx,3); %точки сечения ролика
    Xb = xO22-Xp; Yb = HR-(Rb^2-Xb^2)^(1/2); %точки сечения бандажа
    end %цикл for kx=1 : kH ;
    disp([ IX FLG ]);
end
end

```

```

disp([ sa dBx (dBx-sa)]);
disp('=====');
Zsa=sa*sin(alfa);
Ysa=sa*cos(alfa);
Ls=a0/2-Bb/2;
gama=atan(Ysa/Ls);
beta=atan(Zsa/Ls);
sBB=d0x-sa;
disp('исходные данные:');
disp('расстояние АВ между опорами, мм:');disp(a0);
disp('межосевое расстояние роликоопор, мм:');disp(aw);
disp('радиус ролика, мм:');disp(rRL);
disp('радиус бандажа, мм:');disp(Rb);
disp('ширина бандажа, мм:');disp(Bb );
disp('угол между осями симметрии бандажа и ролика, рад:');disp(alfa);
disp('высота между осями вращения бандажа и ролика, рад:');disp(HR);
disp(sprintf('смещение дальней опоры В, мм=%g \n',d0x));
disp('.....');
disp('Результаты расчета:');
disp('смещения опор, мм:');
disp(sprintf('ближняя А=%g дальняя В=%g \n',sa,sBB));
disp('углы поворота, град:');
disp(sprintf('гамма=%g бета=%g \n',(gama*180/pi),(beta*180/pi)));
disp('=====');
t2 = fix(clock);
disp('старт');disp(t1);
disp('стоп');disp(t2);
t3 = etime(t2,t1); %время (в сек) работы программы
disp(sprintf('время с=%g мин=%g \n',t3,t3/60));

```

## II. 3.2 Form.m. Синтез формы бандажа технологического барабана с идентификацией отклонения от круглости по ГОСТ Р 53442-2009

```

% The calculation of the cross-sectional shape
% of the tire technology of the drum
%Программа FORMA.
%Расчет в полярных координатах формы поперечного сечения бандажа технологического барабана с одним из
трех частных случаев ошибок:
%1. Сечение состоит из четырех условных участков. На двух постоянные радиусы,а на двух их связывающих -
переменные.
% Ввод исходных данных в подпрограмме sam.m.
%2. В каждой четверти сечение состоит из двух участков. На первом из них радиус сначала уменьшается, а
затем симметрично увеличивается до номинального. На втором участке радиус постоянно равен номинальному.
% Ввод исходных данных в подпрограмме samomile.m.
%3. Сечение состоит из двух симметричных, смещенных друг относительно друга по диаметру сегментов.
Выступы на величину смещения сегментов заменены параллельными лысками.
% Ввод исходных данных в подпрограмме halfway.m.
%Расчет выполняется для 62831 положения (тогда на поверхности бандажа, например, при номинальном
радиусе 2425 мм расстояния между точками профиля (0,242мм). Результаты расчета в полярных
координатах(массив IN1) сохраняются на диске в одном из файлов данных (FormCam.mat, FormCamomile.mat
или FormHalfway.mat). В декартовой системе координат см. массив IN8.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
t1 = fix(clock);% время начала работы
global IN100 IN200 royd vyd ayd gam

%Для расчета интересующей формы выбрать значение переменной Face из списка:
%форма Sam - Face = 1;
%форма Samomile - Face = 2;
%форма Halfway - Face = 3;
Face = 1;

%Начальные условия (не изменяемые)
fi=0; % полярный угол (рад)
k=0; % номер положения полярного радиуса (бандаж неподвижен)

```

```

fH = 0.0001;% угловой шаг (рад) полярного угла
kH = 62831; % число положений за оборот радиуса kH = 2*pi/fH=62831,83

%резервируем массивы для результатов
IN100 = zeros(1000);%вектор для промежуточных расчетов в подпрограммах
IN200 = zeros(1000);%вектор для промежуточных расчетов в подпрограммах
IN1 = zeros(kH,6); %результаты расчета IN1(1,:)=fi - полярный угол
                    %IN1(:,2)=rydi- полярный радиус
IN55 = zeros(kH,2); %пересчитанная для круглограммы форма на радиусе 2400мм
IN8 = zeros(kH,2); %расчетная форма в декартовой ск
IN88 = zeros(kH,2); %проекции радиуса на оси ск с центром в узле сетки
%IN10 = zeros(field,field);см. ниже целевая функция в узлах сетки
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    rmin = 10000; rmax = 0.0001;
% цикл вычисления координат за поворот полярного радиуса на 2пи
for j=0 : kH;
    k = k +1; %номер положения
%определяем радиус-вектор соответствующий текущему углу поворота fi
    switch Face
        case 1
            rydi = cam(fi);
            fnameFace = 'FormCam';
        case 2
            rydi = camomile (fi,k);
            fnameFace = 'FormCamomile';
        case 3
            rydi = halfway(fi,k,fH);
            fnameFace = 'FormHalfway';
    end %switch Face

%сохраняем полярные координаты и параметры контакта
    IN1(k,1) = fi; IN1(k,2) =rydi;
    IN1(k,3) = royd;IN1(k,4) = gam; IN1(k,5) = vyd; IN1(k,6) = ayd;

disp([ k rydi ]);
%переходим к следующему фи
    fi = fi + fH;
end %for j=0 : kH;

%сохраняем на диске форму сечения бандажа в файле с расширением mat.
save([fnameFace int2str(Face)], 'IN1');
%сохраняем на диске форму сечения бандажа в текстовом формате
save([fnameFace int2str(Face)], 'IN1', '-ascii');

%определяем круглость в базовой ск
rmin= min(IN1(:,2)); rmax= max(IN1(:,2));
Circle_F = rmax- rmin;

%пересчитываем профиль удаляя окружность радиусом 2400 мм
for I=1 : 62832 ;
IN55(I,2)=IN1(I,2)-2400;
IN55(I,1)=IN1(I,1);
disp( I );
end

disp('для продолжения нажмите любую клавишу');

polar (IN55(:,1), IN55(:,2)) %строим круглограмму на радиусе 2400 мм
pause;

disp(sprintf('начальное отклонение от круглости(мм)=%g \n',Circle_F));
disp(sprintf(' радиусы R_min(мм)=%g R_max (мм)=%g\n',rmin,rmax));
pause;
disp('для продолжения нажмите любую клавишу');

%вычисление отклонения от круглости по ГОСТ Р 53442-2009
field = 201; %число точек сетки (поле) по горизонтали и вертикали
% для симметрии сетки задавать нечетным

```

```

%           тогда число шагов (field-1)
field_mm = 20; %длина поля сетки мм по горизонтали и вертикали
pitch=field_mm/(field-1); %расстояние между точками сетки мм

IN10 = zeros(field,field);%целевая функция в узлах сетки
EFK = 10000;

KY=(field+1)/2; %сдвиг сетки относительно оси X:симметрично-(field+1)/2
%           номера всех строк положительны-field
%           номера всех строк отрицательны-1
KX=(field+1)/2; %сдвиг сетки относительно оси Y:симметрично-(field+1)/2
%           номера всех строк положительны-1
%           номера всех строк отрицательны-field
% Порядок расчета по столбцам слева-направо (по X), а в каждом столбце
% (по Y) сверху - вниз.
for J = 1: kH; %пересчет в декартовую ск
    IN8(J,1)=IN1(J,2)*cos(IN1(J,1));%проекция радиуса на ось X
    IN8(J,2)=IN1(J,2)*sin(IN1(J,1));%проекция радиуса на ось Y
end
for XM = 1: field;%движение по оси X центра новой ск (слева на право)
    DX=(XM-KX)*pitch;%расстояние мм между осями Y базовой и новой ск

    for YM = 1: field;%движение по оси Y центра новой ск при фиксировании
        %по X (сверху вниз)
        DY=(KY-YM)*pitch;%расстояние мм между осями X базовой и новой ск

        rmin = 10000; rmax = 0.0001;
%вычисление координат точек кривой и радиусов в новой ск;
for J = 1: kH;
    IN88(J,1)=IN8(J,1)-DX;%координата по X
    IN88(J,2)=IN8(J,2)-DY;%координата по Y
    rydi = (IN88(J,1)^2+IN88(J,2)^2)^(1/2);%радиус
        if rydi < rmin %
            rmin = rydi;
        end % if rydi < rmin
        if rydi > rmax %
            rmax = rydi;
        end % if rydi > rmax
end %for J = 1: kH;
    F_min = rmax-rmin;
    IN10(YM,XM)=F_min;
    if F_min < EFK
        EFK = F_min;DX_min = DX;DY_min = DY;
        R_min = rmin;R_max = rmax;
    end % if F_min < Fun_min
    disp( [DX DY rmin rmax F_min EFK ]);
    %pause;
end %for YM = 1: field;

end %for XM = 1: field;

C = contour(IN10);%линии равного уровня целевой функции
clabel(C);

disp(sprintf('отклонение от круглости EFK(мм)=%g \n',EFK));
disp(sprintf('центр DX_min(мм)=%g DY_min(мм)=%g\n',DX_min,DY_min));
disp(sprintf(' радиусы R_min(мм)=%g R_max = rmax(мм)=%g\n',R_min,R_max));
disp(sprintf(' field_mm(мм)=%g pitch(мм)=%g ',field_mm,pitch));
disp('Программа FORMA. Результат сохранен в файле');
disp([fnameFace int2str(Face)]);
disp('Расчет закончен.');
```

```

t2 = fix(clock); %время окончания работы
disp('старт');disp(t1);
disp('стоп');disp(t2);
t3 = etime(t2,t1); %время (в сек) работы программы
hour = floor( t3/3600 ); %число полных часов
minute = floor( (t3-hour*3600)/60 );%число полных минут
second = t3 - hour*3600 - minute*60;%остаток секунд

```

```

disp(sprintf('время расчета часов=%g минут=%g секунд=%g\n',hour,minute,second));

%звуковое оповещение о завершении вычислений
xard=(0:0.1:250)*pi; yard=zeros(1,200);
zard=(0:0.1:1000)*pi;
sound([sin(xard),yard,sin(xard),yard,sin(xard),yard,sin(zard*4/5),yard,...
sin(xard*8/9),yard,sin(xard*8/9),yard,sin(xard*8/9),yard,sin(zard*3/4)]);

%см.целевую функцию в узлах сетки массив IN10
%plot(IN8(:,1),IN8(:,2)) проверка задания формы бандажа

function rydi = cam (fi)
%The calculation of the cross-sectional shape cam of the tire .
%The main program FORMA.m.

%Функция вычисляет значение полярного радиуса (rydi)и параметры контакта в текущем положении для
бандажа с ошибками формы поперечного сечения.
%Сечение состоит из четырех условных участков. На двух из них постоянные радиусы,а на двух соседних,
связывающих их - переменные.
%Входные параметры fi - полярный угол (рад), k - номер положения полярного радиуса (бандаж неподвижен).

%Исходные данные:

Rnm=2425;% Номинальный радиус бандажа, мм.
    % Для справки: радиус опорного ролика 750 мм,
    % межосевое расстояние роликов 3175 мм.
H=4;    % Разница между минимальным и максимальным радиусами, мм.
    % Фазовые углы.
fyd=90;% Удаления (радиус увеличивается), град.
fprg=90;% Приближения (радиус уменьшается), град.
fbcg=90;% Ближнего стояния (постоянный минимальный радиус), град.
fdcg=90;% Дальнего стояния (постоянный махимальный радиус), град.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global royd vyd ayd gam

fy=(fyd*pi)/180; fdc=(fdcg*pi)/180; fpr=(fprg*pi)/180; fbc=(fbcg*pi)/180;
ch3 = fy + fdc; ch4 = ch3 + fpr;Ro=Rnm-H ;Rmin=Ro;

    if fi > ch4 && fi < (ch4 + fbc)
        % ближнее стояние
        rydi = Ro;
        gam =0; vyd = 0; ayd = 0; royd = Ro;
    end
    if fi > (ch4 + fbc)
        % удаление
        rydi = Rmin+H.*(fi./fy-sin(2*pi.*fi./fy)/(2*pi));
        vyd = (H./fy)*(1-cos(2*pi.*fi./fy));
        ayd = (2*pi.*H./fy^2)*sin(2*pi.*fi./fy);
        royd = ((rydi^2 + vyd^2)^(3/2))/(rydi^2 + 2*vyd^2 - rydi*ayd);
        if abs(vyd) > 0
            miy = abs(atan(rydi/vyd));
            gam = pi./2 - miy;
        else
            gam = 0; vyd = 0; ayd = 0;
        end
    end
    if (fi > ch3) && (fi < ch4)
        % приближение
        rydi = Rmin+H.*((ch4 - fi)/fpr-(sin(2*pi.*(ch4 - fi)/fpr)/(2*pi)));
        vyd = (H./fpr)*(1-cos(2*pi.*(fpr - fi)/fpr))*(-1);
        ayd = (2*pi.*H./fpr^2)*sin(2*pi.*(fpr - fi)/fpr);
        royd = ((rydi^2 + vyd^2)^(3/2))/(rydi^2 + 2*vyd^2 - rydi*ayd);
        if abs(vyd) > 0
            miy = abs(atan(rydi/vyd));
            gam = pi./2 - miy;
        else
            gam = 0; vyd = 0; ayd = 0;
        end
    end
end

```

```

end
if (fi > fy) && (fi < ch3)
    % дальнейшее стояние
    rydi = Rnm;
    gam = 0; vyd = 0; ayd = 0; royd = Rnm;
end
if fi <= fy
    % удаление
    rydi = Rmin+H.*(fi./fy-sin(2*pi.*fi./fy)/(2*pi));
    vyd = (H./fy)*(1-cos(2*pi.*fi./fy));
    ayd = (2*pi.*H./fy^2)*sin(2*pi.*fi./fy);
    royd = ((rydi^2 + vyd^2)^(3/2))/(rydi^2 + 2*vyd^2 - rydi*ayd);
    if abs(vyd) > 0
        miy = atan(rydi/vyd);
        gam = pi./2 - miy;
    else
        gam = 0; vyd = 0; ayd = 0;
    end
end
end

```

```
function rydi = camomile (fi,k)
```

```
%The calculation of the cross-sectional shape brace camomile.
```

```
%The main program FORMA.m.
```

```
%Функция вычисляет значение полярного радиуса (rydi)и параметры контакта в текущем положении для
бандажа со следующими ошибками формы поперечного сечения. В каждой четверти сечение состоит из двух
участков. На первом из них радиус сначала уменьшается, а затем симметрично увеличивается до
номинального. На втором участке радиус равен номинальному.
%Входные параметры fi - полярный угол (рад), k - номер положения полярного радиуса (бандаж неподвижен).
```

```
% Исходные данные:
```

```
Rnm=2425;% Номинальный радиус бандажа, мм.
```

```
% Для справки радиус опорного ролика 750 мм,
```

```
% межосевое расстояние роликов 3175 мм.
```

```
H=2;% Разница между минимальным и максимальным радиусами, мм.
```

```
fydg=30;% Угол на котором радиус уменьшается от Rnm до Rmin, град.
```

```
% Для ограничения вогнутости применять условие 2*fydg>45 град.
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
global IN100 royd vyd ayd gam
```

```
Rmin=Rnm-H ;
```

```
fprg=fydg;
```

```
fy=(fydg*pi)/180; fpr=(fprg*pi)/180;
```

```
PI90 = 15708;PI180 = 31416;PI270 = 47124;
```

```
%определяем какой радиус-вектор соответствует текущему углу поворота fi
```

```
if fi >= 0 && fi <= pi/2
```

```
    % четверть 1
```

```
    varI = 1;
```

```
    if fi <= fpr
```

```
        rydi = Rmin+H.*((fpr - fi)/fpr-(sin(2*pi.*(fpr - fi)/fpr)/(2*pi)));
```

```
        IN100(k) = rydi ;
```

```
        vyd = (H./fpr)*(1-cos(2*pi.*(fpr - fi)/fpr))*(-1);
```

```
        ayd = (2*pi.*H./fpr^2)*sin(2*pi.*(fpr - fi)/fpr);
```

```
        royd = ((rydi^2 + vyd^2)^(3/2))/(rydi^2 + 2*vyd^2 - rydi*ayd);
```

```
        if abs(vyd) > 0
```

```
            miy = abs(atan(rydi/vyd));
```

```
            gam = pi./2 - miy;
```

```
        else
```

```
            gam = 0; vyd = 0; ayd = 0;
```

```
        end
```

```
    end % fi <= fpr
```

```
    if fi > fpr && fi <= (fy+fpr)
```

```
        rydi = Rmin+H.*((fi - fpr )./fy-sin(2*pi.*(fi - fpr)./fy)/(2*pi));
```

```

IN100(k) = rydi ;
vyd = (H./fy)*(1-cos(2*pi.*fi./fy));
ayd = (2*pi.*H./fy^2)*sin(2*pi.*fi./fy);
royd = ((rydi^2 + vyd^2)^(3/2))/(rydi^2 + 2*vyd^2 - rydi*ayd);
    if abs(vyd) > 0
        miy = abs(atan(rydi/vyd));
        gam = pi./2 - miy;
    else
        gam = 0; vyd = 0; ayd = 0;
    end
end % fi > fy && fi <= (fy+fpr)
if fi > (fpr+fy)
rydi = Rnm;
IN100(k) = rydi ;
gam =0; vyd = 0; ayd = 0; royd = Rnm;
end
end % четверть 1 end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if fi > pi/2 && fi <= pi
        % четверть 2
        varI = 2;
        Ak = k - PI90;
    end % четверть 2 end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if fi > pi && fi <= (3*pi/2)
        % четверть 3
        varI = 3;
        Ak = k - PI180;
    end % четверть 3 end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if fi > (3*pi/2) && fi <= (2*pi)
        % четверть 4
        varI = 4;
        Ak = k - PI270;
    end % четверть 4 end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if varI > 1
        rydi = IN100(Ak);
    end

function rydi = halfway(fi,k,fH)
%The calculation of the cross-sectional shape halfway of the tire.
%The main program FORMA.m.
%Функция вычисляет значение полярного радиуса (rydi) в текущем положении
%для бандажа со следующими ошибками формы поперечного сечения.
%Сечение состоит из двух симметричных, смещенных друг относительно друга
%по диаметру сегментов. Выступы на величину смещения сегментов заменены
%параллельными лысками.
%Входные параметры fi - полярный угол (рад), k - номер положения полярного
%радиуса (бандаж неподвижен), fH - угловой шаг (рад) полярного угла.
%Исходные данные:
Rnm=2425;% Номинальный радиус бандажа, мм.
    % Для справки: радиус опорного ролика 750 мм,
    % межосевое расстояние роликов 3175 мм.
H=2;    % Величина смещения сегментов, мм.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global IN100 IN200
PI180 = 31416;PI360 = 62832; pi=3.14159265359;
L_xorda = 2*(2*Rnm*H-H^2)^0.5; L_xord2 = L_xorda/2;
aLFaR = atan(L_xord2/(Rnm-H));
aLFa = aLFaR/fH; aLFa = floor(aLFa);

%определяем какой радиус-вектор соответствует текущему углу поворота fi
    if k >= 0 && k <= (PI180-aLFa)
        % участок 1

```



```

        rydi = Rnm;
        xAX= Rnm*cos(fi) ;
        IN100(k)= xAX;
        yAY= Rnm*sin(fi) ;
        IN200(k)= yAY;
    end % участок 1 end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if k > (PI180-aLFa) && k <= PI180
        % участок 2 IN200(k)= R_Lic*sin(aLFbR);
        aLFbR = pi-fi;
        R_Lic = (Rnm-H)/cos(aLFbR);
        IN100(k)= Rnm-H;
        IN200(k)= (R_Lic^2-(Rnm-H)^2)^0.5;
        rydi = R_Lic ;
    end % участок 2 end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if k > PI180 && k <= (PI360-aLFa)
        % участок 3
        AX = k-PI180;
        xAX2= IN100(AX)- H;
        yAX2= IN200(AX) ;
        rydi = (xAX2^2+yAX2^2)^0.5;
    end % участок 3 end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if k > (PI360-aLFa) && k <= PI360
        % участок 4
        AX = k-PI180;
        xAX2= IN100(AX)+H;
        yAX2= IN200(AX);
        rydi =(xAX2^2+yAX2^2)^0.5;
    end % участок 4 end

```

**Аудиовизуальные отображения, порождаемые программой**

**Результаты расчетов выводимые в командное окно при выборе формы cam:**

```

начальное отклонение от круглости(мм)=4
радиусы R_min(мм)=2421 R_max (мм)=2425
отклонение от круглости EFK(мм)=1.32906
центр DX_min(мм)=-1.8 DY_min(мм)=1.8
радиусы R_min(мм)=2422.34 R_max (мм)=2423.67
field_mm(мм)=20 pitch(мм)=0.1
время расчета часов=0 минут=6 секунд=22

```

**Результаты расчетов выводимые в командное окно при выборе формы camophile:**

```

начальное отклонение от круглости(мм)=2
радиусы R_min(мм)=2423 R_max (мм)=2425
отклонение от круглости EFK(мм)=2
центр DX_min(мм)=0 DY_min(мм)=0
радиусы R_min(мм)=2423 R_max (мм)=2425
field_mm(мм)=20 pitch(мм)=0.1
время расчета часов=0 минут=6 секунд=57

```

**Результаты расчетов выводимые в командное окно при выборе формы halfway:**

```

начальное отклонение от круглости(мм)=3.99835
радиусы R_min(мм)=2423 R_max (мм)=2427
отклонение от круглости EFK(мм)=1.99917
центр DX_min(мм)=1 DY_min(мм)=0
радиусы R_min(мм)=2424 R_max (мм)=2426
field_mm(мм)=20 pitch(мм)=0.1

```

### П. 3.3 Motion.m. Индентификация параметров для выбора режимов восстановительной обработки бандажей

```

% Motion analysis of the bandage. The trajectory and speed points.
% Indicator diagram. The depth of cutting.
%Программа Motion (Индентификация параметров
%для выбора режимов восстановительной обработки бандажей
%на роликоопорах).
%(Использует подпрограмму twist.m и файл
%данных *.mat (например FormCam1.mat)).
%Для заданного поперечного сечения (профиля) бандажа построение

```

```

%индикаторной диаграммы и определение радиального биения.
%Выбор начального положения инструмента по оси OY.
%Определение касательной подачи при шлифовании путем
%построения графика изменения скорости для всех точек
%профиля при совпадении их траектории с траекторией инструмента.
%Определение движения любой точки на профиле поперечного сечения
%бандаж: траектории, величины и направления скорости относительно
%неподвижной декартовой системы координат.
%
clear all
clc
t1 = fix(clock);%запоминаем время старта
global rS fiS bx ay
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Загружаем профиль сечения бандаж из файла данных *.mat.
%Например FormCam1.mat (см. ниже).
%Данные должны быть подготовлены в полярных координатах
%и находиться в массиве IN1(kH,2):
%полярный угол IN1(k,1) = fi;полярный радиус IN1(k,2) =rydil;
%IN1 должна быть непрерывной монотонной выпуклой функцией
%Начальные условия (не изменяемые)
fi=0;          % полярный угол (рад)
k=0;          % номер положения полярного радиуса (бандаж неподвижен)
fH = 0.0001; % угловой шаг (рад) полярного угла
kH = 62831; % число положений за оборот kH=2*pi/fH=62831
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load FormCam1 IN1;
%Резервируем массивы для результатов
IN2 = zeros(kH,3);%декартовы координаты точки 2
fnameP2 = 'point2_';
IN3 = zeros(kH,3);%декартовы координаты точки 3
fnameP3 = 'point3_';
IN4 = zeros(kH,3);%декартовы координаты точки 4
fnameP4 = 'point4_';
IN5 = zeros(kH,3);%декартовы координаты точки 5
fnameP5 = 'point5_';
IN6 = zeros(kH,3);%декартовы координаты точки 6
fnameP6 = 'point6_';
IN7 = zeros(kH,3);%декартовы координаты точки 7
fnameP7 = 'point7_';
IN8 = zeros(kH,3);%декартовы координаты точки 8
fnameP8 = 'point8_';
IN9 = zeros(kH,3);%декартовы координаты точки 9
fnameP1 = 'point1_';

IN12 = zeros(kH,8);%скорость ;yVk;xn;yn;Vd;alf_Vd;
IN17 = zeros(kH,7);%индикатор k;xfi;DLx;fDL;dxn;rind;yn;
IN15 = zeros(kH,4);%декартовы координаты левого ролика
IN16 = zeros(kH,4);%декартовы координаты правого ролика
IN27 = zeros(kH,1);%индикатор k;yn;
IN20 = zeros(kH,9);%траектория центра k;rydil;rydi2;gam1;gam2;xo;yo;
IN21 = zeros(kH,7);%параметры положения бандаж k;ya;yb;L_xord;
                %aLfA;M_strel;
IN55 = zeros(kH,2);%вспомогательный массив для построения круглограммы
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Задаем постоянные параметры, которых нет в файле профиля.
% Они должны соответствовать размерам бандаж.
aw=3175;          %межосевое расстояние роликоопор, мм
rRL=750;         %радиус ролика, мм
nb = 1;          %число оборотов бандаж в мин
wb = pi*nb/30;   %угловая скорость бандаж, рад/с
% положение инструмента (индикатора) между опорами 1587,5 мм
xos = aw/2;
% Задаем полярные координаты для восьми точек
% траектории которых требуется построить
% Для этого достаточно указать для каждой из них положение kDi
% (полярный угол) при угловом шаге fH = 0.0001 рад;
% Можно использовать значения из ряда (через пятнадцать градусов):

```

```

% 15-2618,30-5236,45-7854,60-10472,75-13090,90-15708,...
% 180-31416,270-47124,360 - 62832
%2      8      3      7
kD2 = 2618;kD3 = 11914;kD4 = 23562;kD5 = 37715;
%1      5      6      4
kD6 = 42957;kD7 = 47124;kD8 = 54978; kD9 = 62832;
%Задаем полярные координаты интересующей точки внутри профиля:
%положение kD_EFK (полярный угол) при угловом шаге fH = 0.0001 рад;
%полярный радиус R_EFK
kD_EFK = 39270;R_EFK=(1.8^2+1.8^2)^(1/2);
%Задаем глубину резания мм
tR = 0.5;
%Задаем высоту шлифовального круга мм
Bk = 50;
%Задаем масштаб круглограммы для проверки профиля мм
Mprof=2410;
%формируем вектора полярных координат профиля
for I=1 : kH ;
    Zer_R = IN1(I,2)/1000;
    if Zer_R<1
disp('Расчет не возможен!Проверьте загружаемый массив.');
```

```

disp([ I Zer_R IN1(I,2)]);
        break
    end
%вектор полярного радиуса исходной формы
    rS(I)= IN1(I,2) ;
%вектор полярного угла исходной формы
    fiS(I)= fH*(I-1);
        if I == kH
%дополняем вектор для поиска в конце цикла производных и корней
            fiS(kH)= fH*(kH);
                for T=(kH+1) : (kH+11350);
                    Ti=T-kH+1 ;
                    rS(T)= IN1(Ti,2) ;
                    fiS(T)= fH*(T) ;
                end
            end
        end
end
%за цикл (поворот барабана) определяем:
%координаты т.О - центра бандажа: хо, уо.
%параметры контакта бандажа и ролика в т.А:
%радиус-вектор ryd1,радиус кривизны royd и угол gam1
%параметры контакта бандажа и ролика в т.В:
%радиус-вектор ryd2,радиус кривизны royd2 и угол gam2
%
for J=0 : kH;
    k = k +1;
%для контакта в т.А определяем радиус-вектор ryd1
%соответствующий текущему углу поворота fi
kN=k-1; khh=1; kE= kN+3;
    if k == 1
S1(1)=rS(kH-1);S1(2)=rS(1);S1(3)=rS(2);S1(4)=rS(3);
        else
X=kN:khk:kE; S1=rS(X);
        end
    ryd1 = S1(2);
    vd=diff(S1)/fH; vyd = vd(2);%аналог скорости
    ad=diff(vd)/fH; ayd = ad(1);%аналог ускорения
%проверка условия: в этом положении радиус-вектор
%постоянный или изменяется
    if abs(vyd) > 0
        miy = atan(ryd1/abs(vyd));
        gam1 = pi./2 - miy;
    royd = ((ryd1^2 + vyd^2)^(3/2))/(ryd1^2 + 2*vyd^2 - ryd1*ayd);
        else
        gam1 = 0; vyd = 0; ayd = 0;
    end
end
%для контакта в т.А параметры определены
%для контакта в т.В сначала определяем его положение

```

```

%по совпадению заданного межосевого расстояния aw с расчетным L
L = 0; kx = 0.9999/fH; %от 57 градусов начинаем
while (aw - L) > 0
    kx = kx+1;
    xfi = k+ kx;
        if kx > (15707)
            %корень не найден - выход за пределы угла поиска
            disp('положение ролика 2 не найдено ');
            disp([ rydi2 abs(aw - L) xfi ]); pause;
            break
        end
end
%для контакта в т.В определяем радиус-вектор rydi2
%соответствующий текущему углу поворота fi
kN=xfi-1; khh=1; kE= xfi+2;
    if kE > kH
        %kE = kE - kH;
    end
X=kN:khk:kE; SS=rS(X);
rydi2 = SS(2);
vd=diff(SS)/fH; vvd2 = vd(2);%аналог скорости
ad=diff(vd)/fH; ayd2 = ad(1);%аналог ускорения
%проверка условия: радиус-вектор в этом положении постоянный или изменяется
if abs(vvd2) > 0
    miy2 = atan(rydi2/abs(vvd2));
    gam2 = pi./2 - miy2;
    royd2 = ((rydi2^2 + vvd2^2)^(3/2))/(rydi2^2 + 2*vvd2^2 - rydi2*ayd2);
else
    gam2 = 0; vvd2 = 0; ayd2 = 0;
end

        x=kx*fH;
        %Вычисляем межосевое расстояние L
        xo1 = rydi1 + rRL*cos(gam1);
        yo1 = rRL*sin(gam1);
        xo2 = rydi2*cos(x) + rRL*cos(x-gam2);
        yo2 = rydi2*sin(x) + rRL*sin(x-gam2);
        L = ((xo1-xo2)^2+(yo2-yo1)^2)^(1/2);
    end %цикл while (aw - L) > 0
%Dля контакта в т.В положение найдено - угол psi, рад.
psi = x; psik = kx;
%Вычисляем координаты центра бандажа xo и yo
%в неподвижной системе координат
deL = atan((yo2-yo1)/(xo1 - xo2));
Dyx = asin(yo1/xo1);
Myx = deL+Dyx;
Lyx = (xo1^2+yo1^2)^(1/2);
ay = Lyx*sin(Myx);
bx = Lyx*cos(Myx);
xo = bx; yo = ay;
%Сохраняем результаты для текущего положения
IN20(k,1) = k;
IN20(k,2) = rydi1; IN20(k,3) = rydi2;
IN20(k,4) = gam1; IN20(k,5) = gam2;
IN20(k,6) = xo; IN20(k,7) = yo;
%Dля этого положения расчет координат центра бандажа закончен.
%Ищем координаты заданных выше точек на профиле бандажа
fi=k*fH;

[xi2, yi2] = twist (kD2,fi,deL);
IN2(k,1) = fi; IN2(k,2) = xi2; IN2(k,3) = yi2;

[xi3, yi3] = twist (kD3,fi,deL);
IN3(k,1) = fi; IN3(k,2) = xi3; IN3(k,3) = yi3;

[xi4, yi4] = twist (kD4,fi,deL);
IN4(k,1) = fi; IN4(k,2) = xi4; IN4(k,3) = yi4;

[xi5, yi5] = twist (kD5,fi,deL);
IN5(k,1) = fi; IN5(k,2) = xi5; IN5(k,3) = yi5;

```

```

[xi6, yi6] = twist (kD6,fi,deL);
IN6(k,1) = fi; IN6(k,2) = xi6; IN6(k,3) = yi6;

[xi7, yi7] = twist (kD7,fi,deL);
IN7(k,1) = fi; IN7(k,2) = xi7; IN7(k,3) = yi7;

[xi8, yi8] = twist (kD8,fi,deL);
IN8(k,1) = fi; IN8(k,2) = xi8; IN8(k,3) = yi8;

[xi9, yi9] = twist (kD9,fi,deL);
IN9(k,1) = fi; IN9(k,2) = xi9; IN9(k,3) = yi9;

%Координаты точки внутри профиля
RDL = R_EFK; fDL = kD_EFK;
xхо = RDL*cos(fDL); yyo = RDL*sin(fDL);
xx1 = xхо*cos(fi) + yyo*sin(fi); yy1 = -xхо*sin(fi) + yyo*cos(fi);
xx2 = xx1*cos(deL) - yy1*sin(deL); yy2 = xx1*sin(deL) + yy1*cos(deL);
xi = bx - xx2; yi = ay - yy2;
IN20(k,8) = xi; IN20(k,9) = yi;

%Сохраняем координаты точек роликов в текущем положении
IN15(k,1) = fi; IN15(k,2) = rRL*cos(fi); IN15(k,3) = rRL*sin(fi);
IN16(k,1) = fi; IN16(k,2) = L+rRL*cos(fi); IN16(k,3) = rRL*sin(fi);

%Ищем координаты мгновенного центра скоростей
aLf1 = deL + gam1;
deL2 = psi - gam2;
aLf2 = pi - deL - deL2;
aLf = pi - aLf1 - aLf2;
xxv1 = L*sin(aLf2)/sin(aLf);
xVк = xxv1*cos(aLf1);
yVк = xxv1*sin(aLf1);

%Скорости точек на роликах
Va = wb*(xxv1-rRL)*0.001; % м/с
xxv2 = L*sin(aLf1)/sin(aLf);
Vb = wb*(xxv2-rRL)*0.001;% м/с

%Индикатор на месте инструмента между опорами.
%Для построения индикаторной диаграммы ищем точку на профиле радиус
%которой пересекается с вертикальной прямой при текущем fi.
%Варьируем углом xfi для которого задаем переменное слагаемое - угол DLx.
xn = 0; DLx = 4720; %от 27 градусов начинаем xos = aw/2
while xos - xn > 0.0
    DLx = DLx+1;
    xfi = k + DLx;
    if DLx > psik
        %Корень не найден - выход за пределы угла поиска
        disp('Положение индикатора не найдено ');
        disp([k DLx*180/pi]);
        break
    end
%Для текущего угла xfi относительно бандажа определяем радиус-вектор rind
rind = rS(xfi);
%Вычисляем отклонение dxn от проекции индикатора
fDL = pi/2-deL-DLx*fH;
zx = rind*sin(fDL);
xn = bx-zx;
dxn = xos - xn;
end %цикл while xos - xn > 0.0

%Проверка результата
zy = rind*cos(fDL);
yn = ay-zy;
if yn < 0
    disp('Что-то пошло не так. Извините. ');
    disp('Дальнейший расчет не возможен. ');
    break
end

%Сохранение параметров индикаторной диаграммы
IN17(k,1) = k;
IN17(k,2) = xfi;
IN17(k,3) = DLx;

```

```

IN17(k,4) = fDL;
IN17(k,5) = dxn;
IN17(k,6) = rind;
IN17(k,7) = yn;
IN27(k,1) = yn;
%Вычисление параметров расположения бандажа на роликах
%Длины хорды и стрелки
xa=rRL*cos(aLf1);xb=xol-rRL*cos(aLf2);
ya=rRL*sin(aLf1);yb=rRL*sin(aLf2);
L_xord=((xb-xa)^2+(yb-ya)^2)^(1/2);
aLfA=asin((yb-ya)/L_xord);
yM=ya+(aw/2-xa)*tan(aLfA);
L_EM=yM-yn;
M_strel=L_EM*cos(aLfA);
IN21(k,1) = k;IN21(k,2) = ya; IN21(k,3) = yb; IN21(k,4) = L_xord;
IN21(k,5) = aLfA; IN21(k,6) = M_strel;
%Определение скорости точки D на бандаже при встрече с инструментом dxn
Vd = wb*((xn-xVk)*0.001)^2+((yVk-yn)*0.001)^2)^(1/2)*60;% м/мин
    if xos == xVk
        alf_Vd = 0;
    else
alf_Vd = pi/2 -atan(abs((yVk-yn)/(xos - xVk)));%xos а надо xn
    end
Vdx = Vd*cos(alf_Vd);%скорость резания(касательная подача при шлифовании)
Vdy = Vd*sin(alf_Vd);%вертикальная скорость

IN12(k,1) = xVk; IN12(k,2) = yVk; %координаты мс
IN12(k,3) = xn; IN12(k,4) = yn; %координаты точки индикатора
IN12(k,5) = Vd; %абсолютная скорость
IN12(k,6) = alf_Vd; %направление абсолютной скорости
IN12(k,7) = Vdx; %скорость резания (касательная подача)
IN12(k,8) = Vdy; %вертикальная скорость
%переходим к следующему фи иначе k
disp([ k ]);
psi=0;
end % окончание цикла поворота барабана for J=0 : kH;

% yn - координата точки пересечения rind с вертикальной прямой
% проверяем на мин по y.
ymin = 100000; ymax = 1;
for L = 1: kH;
    yL = IN17(L,7);
        if yL < ymin
            ymin = yL;
rymin = IN17(L,6); fimin =IN17(L,2)*fH; kmin = IN17(L,1);
        end
        if yL > ymax
            ymax = yL;
rymax = IN17(L,6); fimax =IN17(L,2)*fH; kmax = IN17(L,1);
        end
end
%Радиальное биение
ECR = ymax-ymin;
%Для построения круглограммы вычисление профиля в масштабе
for I=1 : 62832;
    IN55(I,2)=IN1(I,2)-Mprof;
    IN55(I,1)=IN1(I,1);
disp( I );
end
%Запись результатов на диск
save([fnameP1 int2str(kD9)], 'IN9');save([fnameP2 int2str(kD2)], 'IN2');
save([fnameP3 int2str(kD3)], 'IN3');save([fnameP4 int2str(kD4)], 'IN4');
save([fnameP5 int2str(kD5)], 'IN5');save([fnameP6 int2str(kD6)], 'IN6');
save([fnameP7 int2str(kD7)], 'IN7');save([fnameP8 int2str(kD8)], 'IN8');

save Velocity IN12; %скорость ;yVk;xn;yn;Vd;alf_Vd;
save VelocityTXT -ascii IN12;
save Indicator IN17; %индикатор k;xfi;DLx;fDL;dxn;rind;yn;
save IndicatorTXT -ascii IN17;

```

```

save Trajectory_Center IN20;%тр центра k;ryd1;ryd2;gam1;gam2;xo;yo;xi;yi;
save Trajectory_CenterTXT -ascii IN20;
save Parameter IN21;%k;ya;yb;L_xord;aLfA;M_strel;
save ParameterTXT -ascii IN21;

plot(IN17(:,7))%показания индикатора
disp('ПРОГРАММА Motion расчет закончен.');
```

disp('Результаты расчета:');

```

disp(sprintf('ymin мм=%g ymax мм=%g \n',ymin,ymax));
disp(sprintf('радиальное биение мм=%g \n',ECR));
disp(sprintf('нижнее положение индикатора мм=%g \n',ymin));
disp(sprintf('глубина резания мм=%g \n',tR));
Yr=ymin+tR;
disp(sprintf('начальное положение инструмента мм=%g \n',Yr));
Spr_mn=0.2*Bk;Spr_mx=0.85*Bk;
Vdx_mx=(max(IN12(:,7))); Vdx_mn=(min(IN12(:,7)));
VdKP=(mean(IN12(:,7)));
disp('Параметры при обработке осцилирующим шлифованием:');
disp(sprintf('высота шлифовального круга мм=%g \n',Bk));
disp(sprintf('максимальная продольная подача мм/об=%g \n',Spr_mx));
disp(sprintf('средняя касательная подача м/мин=%g \n',VdKP));
SprR_mx=0.6;
disp('Параметры при обработке резанием:');
disp(sprintf('максимальная продольная подача мм/об=%g \n',SprR_mx));
disp(sprintf('средняя скорость резания м/мин=%g \n',VdKP));
disp(sprintf('максимальная скорость резания м/мин=%g \n',Vdx_mx));
disp(sprintf('минимальная скорость резания м/мин=%g \n',Vdx_mn));
Vdalf=max(IN12(:,6))-min(IN12(:,6));
disp(sprintf('изменение направления (рад) абсолютной скорости т.Д=%g \n',Vdalf));
Vdy_mx=(max(IN12(:,8)));Vdy_mn=(min(IN12(:,8)));
VDY=Vdy_mx-Vdy_mn;
disp(sprintf('максимальная вертикальная скорость т.Д м/мин=%g \n',Vdy_mx));
disp(sprintf('изменение вертикальной скорости т.Д м/мин=%g \n',VDY));
pointXOmх=max(IN20(:,6));pointXOmн=min(IN20(:,6));
SpointXO=pointXOmх-pointXOmн;
pointOmх=max(IN20(:,7));pointOmн=min(IN20(:,7));
SpointO=pointOmх-pointOmн;
disp(sprintf('верхнее положение центра бандажа мм=%g \n',pointOmх));
disp(sprintf('нижнее положение центра бандажа мм=%g \n',pointOmн));
disp(sprintf('перемещение центра по вертикали мм=%g \n',SpointO));
disp(sprintf('крайнее левое положение центра бандажа мм=%g \n',pointXOmх));
disp(sprintf('крайнее правое положение центра бандажа мм=%g \n',pointXOmн));
disp(sprintf('перемещение центра по горизонтали мм=%g \n',SpointXO));
DL_xord=max(IN21(:,4))-min(IN21(:,4));
disp(sprintf('изменение длины хорды связывающей точки контакта мм=%g \n',DL_xord));
DaLfA=max(IN21(:,5))-min(IN21(:,5));
disp(sprintf('изменение положения хорды относительно горизонта=%g \n',DaLfA));
DM_strel=max(IN21(:,6))-min(IN21(:,6));
disp(sprintf('изменение длины стрелки профиля бандажа мм=%g \n',DM_strel));

t2 = fix(clock);
disp('старт');disp(t1);
disp('стоп');disp(t2);
t3 = etime(t2,t1); %время (в сек) работы программы
disp(sprintf(' время с=%g мин=%g \n',t3,t3/60));

%При необходимости визуализации результатов расчета в табличном виде
%следует в окне Workspase открыть выбранный массив.
%Для построения графиков использовать следующий список
%(команду для построения графика выбранной функции скопировать
%в Command Window и нажать Enter):
%проверка формы бандажа в натуральную величину
%polar (fiS, rS)
%проверка формы бандажа в масштабе Mprof
%polar (IN55(:,1), IN55(:,2))
%траектории заданных точек на бандаже и на роликах
%plot(IN2(:,2),IN2(:,3),IN3(:,2),IN3(:,3),IN4(:,2),IN4(:,3),IN5(:,2),IN5(:,3),IN6(:,2),IN6(:,3),IN15(:,
2),IN15(:,3),IN16(:,2),IN16(:,3))
%траектория центра т.О
```

```

%plot(IN20(:,6),IN20(:,7))
%траектория мгновенного центра скоростей
%plot(IN12(:,1),IN12(:,2))
%изменение длины хорды связывающей точки контакта А и В
%plot(IN21(:,4))
%изменение положения хорды относительно горизонта
%plot(IN21(:,5))
%изменение длины стрелки профиля бандажа
%plot(IN21(:,6))
%изменение абсолютной скорости
%plot(IN12(:,5))
%изменение направления абсолютной скорости
%plot(IN12(:,6))
%изменение скорости резания (касательной подачи)
%plot(IN12(:,7))
%изменение вертикальной скорости
%plot(IN12(:,8))

function [xi, yi] = twist (kD,fi,deL)
%
%
%Программа twist.
%Функция Анализ движения бандажа на роликоопорах. Определение движения любой точки
%на профиле поперечного сечения бандажа:траектории,величины и направления
%скорости относительно неподвижной декартовой системы координат.
%Построение индикаторной диаграммы для случая расположения инструмента
%между опорами. Построение графика изменения скорости для всех точек
%профиля при совпадении их траектории с траекторией инструмента.
%Выбор начального положения инструмента по оси ОУ.
global rS fiS bx ay
        RDL = rS(kD); fDL = fiS(kD);
        xxo = RDL*cos(fDL); yyo = RDL*sin(fDL);
        xx1 = xxo*cos(fi) + yyo*sin(fi); yy1 = -xxo*sin(fi) + yyo*cos(fi);
        xx2 = xx1*cos(deL) - yy1*sin(deL); yy2 = xx1*sin(deL) + yy1*cos(deL);
        xi = bx - xx2; yi = ay - yy2;

```

#### Аудиовизуальные отображения, порождаемые программой

##### Результаты расчетов выводимые в командное окно:

umin мм=323.415 утах мм=325.181; радиальное биение мм=1.7663; нижнее положение индикатора мм=323.415;
 глубина резания мм=0.5; начальное положение инструмента мм=323.915. Параметры при обработке
 осциллирующим шлифованием: высота шлифовального круга мм=50; максимальная продольная подача мм/об=42.5;
 средняя касательная подача м/мин=15.2402. Параметры при обработке резанием: максимальная продольная
 подача мм/об=0.6; средняя скорость резания м/мин=15.2402; максимальная скорость резания м/мин=15.2681;
 минимальная скорость резания м/мин=15.2116; изменение направления (рад) абсолютной скорости
 т.Д=0.0022737; максимальная вертикальная скорость т.Д м/мин=0.0346976; изменение вертикальной скорости
 т.Д м/мин=0.0346975; верхнее положение центра бандажа мм=2749.63; нижнее положение центра бандажа
 мм=2744.95; перемещение центра по вертикали мм=4.68244; крайнее левое положение центра бандажа
 мм=1591.38 ; крайнее правое положение центра бандажа мм=1583.75; перемещение центра по горизонтали
 мм=7.63074; изменение длины хорды связывающей точки контакта мм=5.80326; изменение положения хорды
 относительно горизонта (рад)=0.000921538; изменение длины стрелки профиля бандажа мм=1.85989

## П. 3.4. Working.m. Моделирование процесса восстановительной неуправляемой обработки переносными станками бандажей технологических барабанов

```

%Modeling of the process of rehabilitation of unmanaged machining
%portable lathes, tire technology drums
%Программа Working
%(Моделирование процесса восстановительной неуправляемой обработки
%переносными станками бандажей технологических барабанов)
%(Использует файл данных *.mat (например FormCam1.mat))
%Вычисляет форму поперечного сечения (профиля) бандажа
%при стационарном инструменте расположенном симметрично относительно
%точек контакта с бандажом технологической базы станка.
%Возможно рассмотрение следующих вариантов конструкции оборудования:
%1. Станок с динамическим самоустанавливающимся суппортом (ДСС).
%2. Станок УВС-М между опорами или станок на вращающемся кронштейне (СВК).
%3. Станок УВС-М или СВК при неизменной поверхности базирования бандажа.

```



```

%После каждого прохода определяется отклонение от круглости
%по ГОСТ Р 53442-2009. Это позволяет при заданной глубине резания
%выбрать число проходов необходимое для достижения наименьшего
%отклонения от круглости.
%
clear all
clc
%Запоминаем время старта
t1 = fix(clock);
%Исходные данные
%Загружаем профиль сечения банджа из файла данных *.mat.
%Он должен располагаться в одной папке с программой.
%Данные должны быть подготовлены в полярных координатах
%и находиться в массиве IN1(kH,2), где
%IN1(k,1)=fi-полярный угол, IN1(k,2)=ryd1l-полярный радиус.
%IN1 должна быть непрерывной монотонной выпуклой функцией
fnameFP = 'FormCam1'; %Указываем имя файла профиля
load ([fnameFP], 'IN1');
% Начальные условия (не изменяемые)
fi=0; % полярный угол (рад)
k=0; % номер положения полярного радиуса (бандаж неподвижен)
fH = 0.0001;% угловой шаг (рад) полярного угла
kH = 62831; % число положений за оборот kH=2*pi/fH=62831
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Задаем постоянные параметры, которых нет в файле профиля.
% Они должны соответствовать размерам банджа.
aw=3175; %межосевое расстояние роликоопор, мм
rRL=750; %радиус ролика, мм
% Положение инструмента (индикатора) между опорами 1587,5 мм
xos = aw/2;
% Координата точки резания YR мм (выбрать предварительно
% по индикаторной диаграмме и глубине резания)
% Для первого прохода задаем (далее вычисляется)
YR=323.415; YR0=YR;
% Глубина резания мм (далее постоянна для всех проходов)
tR=0.05;
% Число KW проходов
KW = 21; KWE = KW;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Выбрать вариант контакта технологической базы станка с банджом:
%1.По обработанной поверхности (ДСС)- ТВace=1
%2.По поверхности полученной при предыдущем проходе (УВС-М или СВК)-ТВace=2
%3.По неизменяемой поверхности (УВС-М или СВК)-ТВace=3
ТВace=1;
%Резервируем массивы для результатов.
IN9 = zeros(kH,7); % Параметры процесса обработки для одного прохода
IN10 = zeros(kH,4);% Координаты центра банджа
IN5 = zeros((kH+11350),KW);% Полярные радиусы для каждого для KW проходов
IN5spL = zeros(kH,2); % Полярные радиусы после сплайн-интерполяции
IN6 = zeros((kH+11350),KW);% Изменение глубины резания в течении прохода
IN66 = zeros(kH,10); % Параметры вычисляемые при сплайн-интерполяции
IN7 = zeros((kH+11350),KW);% Индикаторная диаграмма за KW проходов
IN88 = zeros(kH,10);% Параметры при вычислении отклонения от круглости
IN8 = zeros(kH,10); % Параметры при вычислении отклонения от круглости
IN4 = zeros(KW,7); % Результат поиска отклонения от круглости
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fnameR = 'rydi';fnameIN = 'indik';fnameTRz = 'trez';fnameRz = 'rezanie';
fnameCe = 'centr';fnameE = 'EFK';
%Формируем вектора полярных радиуса и угла исходной формы
for I=1 : kH ;
    Zer_R = IN1(I,2)/1000;
    if Zer_R<1
disp('Расчет не возможен! Проверьте загружаемый массив. ');
disp([ I Zer_R IN1(I,2)]);
        break
    end
    %Вектор полярного радиуса исходной не изменяемой формы
    rS1(I)= IN1(I,2) ;
    %Вектор полярного радиуса изменяемой на текущем

```

```

%проходе формы
rS(I)= IN1(I,2) ;
%Вектор полярного радиуса измененной на предыдущем
%проходе формы
rS2(I)= IN1(I,2) ;
%Вектор полярного угла исходной формы
fiS(I)= fH*(I-1);
%Массив изменения формы бандажа
IN5(I,1)= fiS(I);IN5(I,2)= rS(I);
    if I == kH
%Дополняем вектор для поиска в конце цикла производных и корней
    fis(kH)= fH*(kH);
    IN5(kH,1)= fiS(kH);
        for T=(kH+1) : (kH+11350);
            Ti=T-kH+1 ;
            rS(T)= IN1(Ti,2);rS1(T)= IN1(Ti,2);rS2(T)= IN1(Ti,2);
            IN5(T,2)= rS(T);
            fiS(T)= fH*(T) ;
            IN5(T,1)= fiS(T);
        end
    end
end
% Цикл последовательной обработки за W поворотов барабана
for W=1 : KW;
% Цикл поиска координат и обработка за поворот барабана цикл j
xfiE = 100000; xfiEE = 100000;k=0;
gam1 = 0; gam2 = 0;
%=====
for J=0 : kH;
    k = k +1;
%Определяем какой радиус-вектор соответствует текущему углу поворота fi
    switch TBace
        case 1
            ryd1l = rS(k); %По обработанной поверхности
        case 2
            ryd1l = rS2(k); %По поверхности полученной при предыдущем проходе
        case 3
            ryd1l = rS1(k); %По неизменяемой поверхности
    end
%Для текущего угла поворота относительно бандажа нашли радиус-вектор
%начинаем в цикле искать по совпадению межосевого расстояния
%положение ролика 2
    L = 0; kx = 0.9999/fH; %от 57 градусов начинаем
    while (aw - L) > 0
        kx = kx+1;
        xfi = k+ kx;
        if kx > (15707)
            %Корень не найден - выход за пределы угла поиска
            disp('Положение ролика 2 не найдено ');
            disp([ rydi2 abs(aw - L) xfi ]); pause;
            break
        end
    end
%Для текущего угла xfi относительно бандажа определяем радиус-вектор
    switch TBace
        case 1
            rydi2 = rS(xfi); %По обработанной поверхности
        case 2
            rydi2 = rS2(xfi); %По поверхности полученной при предыдущем проходе
        case 3
            rydi2 = rS1(xfi); %По неизменяемой поверхности
    end
    x=kx*fH;
    %Вычисляем межосевое расстояние L
        xo1 = ryd1l + rRL*cos(gam1);
        yo1 = rRL*sin(gam1);
        xo2 = rydi2*cos(x) + rRL*cos(x-gam2);
        yo2 = rydi2*sin(x) + rRL*sin(x-gam2);
    L = ((xo1-xo2)^2+(yo2-yo1)^2)^(1/2);
    end %while (aw - L) > 0

```

```

    psi = x; psik = kx;
%Вычисляем координаты центра бандажа в неподвижной системе координат
    deL = atan((yo2-yo1)/(xo1 - xo2));
    Dyx = asin(yo1/xo1);
    Myx = deL+Dyx;
    Lyx = (xo1^2+yo1^2)^(1/2);
    ay = Lyx*sin(Myx);
    bx = Lyx*cos(Myx);
    xo = bx; yo = ay;
%Сохраняем результаты для текущего положения
    IN10(k,1) = k; IN10(k,2) = rydil; IN10(k,3) = xo; IN10(k,4) = yo;
%Расчет координат центра бандажа для этого положения закончен.
%.....
%Моделирование обработки.
%Инструмент по середине между точками контакта с
%бандажом технологической базы станка.
%Заданные координаты инструмента: xos и YR.
%Ищем точку радиус которой при данном f1 пересекается
%с траекторией инструмента. Варьируем углом xfi для
%которого задаем переменное слагаемое - угол DLx.
    xn = 0; DLx = 4720; %от 27 градусов начинаем
    while xos - xn > 0.0
        DLx = DLx+1;
        xfi = k + DLx;
        if DLx > psik
            %Корень не найден - выход за пределы угла поиска
            disp('Положение индикатора не найдено! ');
            disp([k xn abs(xos - xn) xfi*180/pi psi*180/pi DLx*180/pi]); pause;
            break
        end
    %Для текущего угла xfi относительно бандажа определяем радиус-вектор rind
    rind = rS(xfi);
%Вычисляем отклонение dxn от траектории инструмента
    fDL = pi/2-deL-DLx*fH;
    zx = rind*sin(fDL);
    xn = bx-zx;
    dxn = xos - xn;
    end %while xos - xn > 0.0
%.....
%Получено первое приближение к корню.
    Pw = 0; zW = ay-YR;
%Проверяем условие последовательности контакта.
%Число пропущенных положений Pw
    if k ==1
        Pw = 1; Da = xfi-1;
    else
        Pw = xfi - xfiE;
    end
%Анализируем влияние первого приближения к корню на обработку.
%.....
%1.Обратное движение.
    if Pw < 0 %Инструмент повторно контактирует с точкой
        disp('Обратное движение!'); %расположенной на уже обработанной поверхности
        disp([ Pw xfi xfiE dxn]);
        if dxn > abs(0.3) %Проверяем отклонение
            disp('Плохое отклонение корня 1'); %Отклонение больше 0,3 мм.
            disp([ xfiE xfi xfiE dxn]); %Расчет остановлен. Надо принять
            pause; %решение: выход-Ctrl-C;продолжить-Enter.
            end
            Pw = 1; %Разрешаем обработку
        end
%.....
%2.Повторение.
%Текущее xfi и предыдущее xfiE совпадают.
        if Pw == 0
            disp('Повторение!'); %Не допускаем.
            disp([ Pw xfi xfiE dxn]);
            xfi = xfiE+1; %Сдвигаем корень вперед.
            rind = rS(xfi); %

```

```

%Проверяем отклонение
DLx = xfi - k;
fDL = pi/2-deL-DLx*fH;
zx = rind*sin(fDL);
xn = bx-zx;
dxn = xos - xn;
disp([ Pw xfi xfiE dxn]);
if dxn > abs(0.3)
disp('Плохое отклонение корня 2!');%Отклонение больше 0,3 мм.
disp([ xfiEE xfi xfiE dxn]);%Расчет остановлен. Надо принять
pause; %решение: выход-Ctrl-C;продолжить-Enter.
end
Pw = 1; %Разрешаем обработку
end %if Pw == 0
%.....
%Рассматриваем два варианта (3 и 4) приводящих к обработке
if Pw == 1 %3.Положение xfi следует за предыдущим xfiE. А также
zy = rind*cos(fDL); %случаи 1 и 2 с разрешением на обработку.
yn = ay-zy;
if yn < 0
disp('Что-то пошло не так. Извините. ');
disp('Дальнейший расчет не возможен. ');
break;
end
trZ=YR-yn; %Текущий припуск
if trZ >= 0
rW=(zx^2+zW^2)^(1/2); %Резание. Новый радиус.
rS(xfi)= rW ; %Изменяем профиль бандажа.
if xfi >= kH %Изменяем профиль также симметрично в начале вектора.
Tw=xfi-kH+1 ;
rS(Tw)= rW;
end %if xfi >= kH
IN6(xfi,W) = trZ; %Запоминаем(отн. бандажа) текущую глубину резания
yn = YR ; %Меняем показание индикатора.
end % if trZ >= 0
%Сохраняем результаты для текущего положения
IN9(xfi,1) = k; IN9(xfi,2) = xfi; IN9(xfi,3) = DLx; IN9(xfi,4) = fDL;
IN9(xfi,5) = dxn; IN9(xfi,6) = rind; IN9(xfi,7) = yn;
%.....
else %4. Положение xfi опережает предыдущее xfiE на Pw
for V = 1:Pw; %Для каждого рассматриваем возможность
xfiv = xfiE + V; %обработки.
DLxv = xfiv - k;
fDL = pi/2-deL-DLxv*fH;
rind = rS(xfiv);
zx = rind*sin(fDL);
zy = rind*cos(fDL);
yn = ay-zy;
xn = bx-zx;
dxn = xos - xn;
trZ=YR-yn; %Текущий припуск
if trZ >= 0
rW=(zx^2+zW^2)^(1/2); %Резание. Новый радиус.
rS(xfiv)= rW ; %Изменяем профиль бандажа.
if xfiv >= kH %Изменяем профиль также симметрично в начале вектора.
Tw=xfiv-kH+1 ;
rS(Tw)= rW;
end
IN6(xfi,W) = trZ; %Запоминаем (отн. бандажа) текущую глубину резания
yn = YR; %Меняем показание индикатора
end %trZ >= 0
if dxn > abs(0.3)
disp('Плохое отклонение корня 4!');%Отклонение больше 0,3 мм.
disp([ xfiEE xfi xfiE dxn]); %Расчет остановлен. Надо
disp('Выход-Ctrl-C;Продолжить-Enter');%принять решение.
pause;
end
if Pw < 0
disp('обратное движение 3');

```

```

disp([ Pw xfiEE xfi xfiE dxn]);%Расчет остановлен. Надо
disp('Выход-Ctrl-C;Продолжить-Enter');%принять решение.
pause;
end
%Сохраняем результаты для текущего положения
IN9(xfiv,1) = k; IN9(xfiv,2) = xfiv; IN9(xfiv,3) = DLxv; IN9(xfiv,4) = fDL;
IN9(xfiv,5) = dxn; IN9(xfiv,6) = rind; IN9(xfiv,7) = yn;
end %%for V = 1:Pw;
end % if Pw == 1
%.....
%Обработка для текущего положения закончена.
%Сохраняем показание индикатора
IN7(k,W) = yn;
%xfiEE предыдущее конечное сохраненное положение
%xfiE текущее конечное сохраняемое положение
xfiEE = xfiE;
xfiE = xfi;
%Переходим к следующему фи иначе k
disp([ k W ]);
psi=0;
end % цикл j поиска координат и обработка за поворот барабана
%=====
PR = W+1;%Номер столбца для радиус-вектора в IN5 для текущего W прохода
for N = 1: (kH+11350);
IN5(N,PR)= rS(N);
end % цикл сохранения формы бандажа
%Удаляем пустые строки в массиве результатов
BA = 0;KA = 1;NA = 1;
while NA > 0
NA = (Da-1) - BA ;
IN9(KA,:)=[];
disp( NA );
BA = BA + 1 ;
end
%Вычисление минимального и максимального показаний индикатора
%для текущего W прохода
ymin = 100000; ymax = 1;
for L =1: kH;
yL = IN9(L ,7);
if yL < ymin
ymin = yL;
rymin = IN9(L,6); fimin =IN9(L,2)*fH; kmin = IN9(L,1);
end
if yL > ymax
ymax = yL;
rymax = IN9(L,6); fimax =IN9(L,2)*fH; kmax = IN9(L,1);
end
end
%=====
IN4(W,7) = ymax-ymin;%Радиальное биение
ECR=IN4(W,7);
YR = ymin+tR; %Изменение положения инструмента для следующего прохода
%=====
%Интерполяция радиуса профиля на интервалах резания
for NA = 1: 62831; %Переписываем старый в новый
IN5spL(NA,PR)=IN5(NA,PR);
IN5spL(NA,1)=IN5(NA,1);
end
xH=1000; %xH - начальный шаг интерполяции ;kH = 62831;
%FLAG-число интервалов резания,schet-число положений на интервале,
%JJ_end - положение в начале интервала
FLAG = 0; schet = 0; JJ_end = 0;
for JJ = 1: kH; %Цикл отсева интервалов
if IN6(JJ,W) > 0 %Условие резания в этом положении
%Определение интервалов с резанием
%.....
if FLAG == 0; %Если первый раз
FLAG = 1; %первый интервал
JJ_end = JJ;

```

```

schet = 1;
IN66(1,1) = FLAG;      %Запоминаем в строке: номер интервала
IN66(1,2) = JJ;       %                               начальное положение
IN66(1,3) = JJ;       %                               конечное положение
IN66(1,4) = schet;    %                               число положений на интервале
end
%.....
if JJ_end == (JJ-1)    %Если по порядку
    JJ_end = JJ;
    schet = schet+1;
    IN66(FLAG,3) = JJ;
    IN66(FLAG,4) = schet;
end
%.....
if JJ > (JJ_end+1)    %Если зашли после разрыва
    FLAG = FLAG+1;
    schet = 1;
    IN66(FLAG,1) = FLAG;
    IN66(FLAG,2) = JJ;
    IN66(FLAG,3) = JJ;
    IN66(FLAG,4) = schet;
    JJ_end = JJ;
end
%.....
    end %if IN6(JJ,W) > 0
    disp( JJ );
end %Цикл отсева интервалов for JJ = 1: kH;
%Число интервалов интерполяции - FLAG
%На каждом интервале начальное положение B1 - IN66(FLAG,2),
%конечное E1- IN66(FLAG,3)
for FG = 1:FLAG;      %Цикл интервалов интерполяции
    KO = 0;KA = 0;KB = 0; NY= 0;
    B1 = IN66(FG,2);   %начальное положение
    E1 = IN66(FG,3);   %конечное положение
    K1 = IN66(FG,4)/1000; %дробное число участков на текущем
                        %интервале при шаге интерполяции
                        %1000 положений
    Kh1=floor(K1);     %целое число участков на интервале FG
    if Kh1 >= 1        %определение последовательности интерполяции
        xH22 = (IN66(FG,4)-1)/Kh1; %шаг не целое;
        xH2=floor(xH22); %шаг на каждом участке;
        KB = 1;        %флаг - несколько участков
            if abs(xH22-xH2) > 0 %проверка на остаток
                KO = 1; %флаг KO - есть остаток - доп. участок
                KA = 1; %флаг KA - неизвестно начало доп. участка
            end
        else            %один участок длиной меньше 1000
            xH2 = (IN66(FG,4)-1); %длина xH2 участка;
            KO = 1;        %флаг - есть один участок с условиями FG
        end
        if KB == 1     %флаг - несколько участков
            IN5_1 = [B1:xH2:E1]; %изменение аргумента на интервале интерполяции
                                %точки результатов интерполяции
            yspline1 = interp1(IN5(:,PR),IN5_1,'spline');
            yb1 = yspline1(1); %функция в начале интервала
            for NY = 1:Kh1; %номер участка с шагом xH2;
                yel= yspline1(NY+1);
                yal = yel - yb1;
                for X = 0:xH2; %точки отброшенные при интерполяции
                    yi = yal*X/xH2; %линейная зависимость
                    rydi = yb1+yi; %функция между точками интерполяции
                    XN = B1+(NY-1)*xH2+X; %аргумент функции
                    IN5spL(XN,PR)=rydi; %сохраняем новое значение
                end
                yb1 = rydi;
            end
        end %if KB == 1
    if KO == 1        %флаг - есть один участок
        if KA == 1    %флаг - вычисление начала одиночного участка

```

```

        B1 = XN;
    end
    xH2 = E1 - B1;
    yb1 = IN5(B1,PR);
    yel= IN5(E1,PR);
    yal = yel - yb1;
    for X = 0:xH2; %
        yi = yal*X/xH2;
        rydi = yb1+yi;
        XN = B1+X;
        IN5spL(XN,PR)=rydi;
    end
end % if KO == 1
end %for FG = 1:FLAG;
%Интерполяция завершена
%=====
%Dополняем вектор в конце цикла
for TW=(kH+1) : (kH+11350);
    Ti=TW-kH+1 ;
    IN5spL(TW,PR)= IN5spL(Ti,PR);
    fiS(TW)= fH*(TW) ;
    IN5spL(TW,1)= fiS(TW);
end
%Сохраняем форму бандажа после одного (W-го) прохода
for N = 1: (kH+11350);%Цикл сохранения формы бандажа
    rS(N) = IN5spL(N,PR);
    rS2(N) = rS(N); %Изменение вектора полярного радиуса предыдущего прохода
    IN5(N,PR)= rS(N);%Сохранение формы бандажа для текущего W прохода
end
save([fnameRz int2str(W)], 'IN66');
save([fnameCe int2str(W)], 'IN10');
save([fnameIN int2str(KWE)], 'IN7');
%=====
%Вычисление отклонения от круглости по ГОСТ Р 53442-2009
field = 101; %число точек сетки (поле) по горизонтали и вертикали
% для симметрии сетки задавать нечетным
% тогда число шагов (field-1)
field_mm = 10; %длина поля сетки мм по горизонтали и вертикали
pitch=field_mm/(field-1); %расстояние между точками сетки мм
IN101 = zeros(field,field);%целевая функция в узлах сетки
EFK = 10000;
KY=(field+1)/2; %сдвиг сетки относительно оси X:симметрично-(field+1)/2
% номера всех строк положительны-field
% номера всех строк отрицательны-1
KX=(field+1)/2; %сдвиг сетки относительно оси Y:симметрично-(field+1)/2
% номера всех строк положительны-1
% номера всех строк отрицательны-field
% Порядок расчета по столбцам слева-направо (по X), а в каждом столбце
% (по Y) сверху - вниз.
for J = 1: kH; %пересчет в декартовую ск
    IN8(J,1)=IN5(J,PR)*cos(IN5(J,1));%проекция радиуса на ось X
    IN8(J,2)=IN5(J,PR)*sin(IN5(J,1));%проекция радиуса на ось Y
end
for XM = 1: field;%движение по оси X центра новой ск (слева на право)
    DX=(XM-KX)*pitch;%расстояние мм между осями Y базовой и новой ск
    for YM = 1: field;%движение по оси Y центра новой ск при фиксировании
        %по X (сверху вниз)
        DY=(KY-YM)*pitch;%расстояние мм между осями X базовой и новой ск
        rmin = 10000; rmax = 0.0001;
%вычисление координат точек кривой и радиусов в новой ск;
for J = 1: kH;
    IN88(J,1)=IN8(J,1)-DX;%координата по X
    IN88(J,2)=IN8(J,2)-DY;%координата по Y
    rydi = (IN88(J,1)^2+IN88(J,2)^2)^(1/2);%радиус
        if rydi < rmin %
            rmin = rydi;
        end % if rydi < rmin
        if rydi > rmax %
            rmax = rydi;

```

```

        end % if rydi > rmax
end %for J = 1: kH;
    F_min = rmax-rmin;
    IN101(YM, XM)=F_min;
    if F_min < EFK
        EFK = F_min; DX_min = DX; DY_min = DY;
        R_min = rmin; R_max = rmax;
        end % if F_min < Fun_min
    disp( [DX DY rmin rmax F_min EFK ]);
    end %for YM = 1: field;
    end %for XM = 1: field;

%Сохранение результатов расчета отклонения от круглости
IN4(W,1) = W; IN4(W,2) = EFK; IN4(W,3) = DX_min; IN4(W,4) = DY_min;
IN4(W,5) = R_min; IN4(W,6) = R_max;

%Запись результатов в файлы на диске
if W==KW
    save([fnameE int2str(KWE)], 'IN4'); % Отклонения от круглости
    save([fnameE int2str(KWE)], 'IN5'); % Профили
    save([fnameIN int2str(KWE)], 'IN7'); % Индикаторные диаграммы
    save([fnameTRz int2str(KWE)], 'IN6'); % Переменная глубина резания
end %if W== KW
clear IN9
end %цикл последовательной обработки за W поворотов барабана for W=1:KW;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Цикл сохранения последней из всех формы в загружаемый массив IN1
for N = 1: kH;
    IN1(N,2)= IN5spL(N,W);
end
%.....
%Подготовка результатов для вывода на экран
%Удаляем пустые строки в массиве индикаторной диаграммы
MsEnd = length(IN7(:,1));
    if MsEnd > 62832
MsE=MsEnd; NA=1;
while NA > 0
    NA = MsE - 62833;
    IN7(MsE,:)=[];
    disp( MsE );
    MsE = length(IN7(:,1));
end
    end
ymino = min(IN7(:,1)); ymaxo = max(IN7(:,1));
MsEnd = length(IN4(:,1));
ECRo = ymaxo-ymino;
[YK, IK] = min(IN4(:,2)); %Минимум отклонения от круглости
WIK = W; %Выводим данные последнего прохода
if IK>1
ymin = min(IN7(:,IK)); ymax = max(IN7(:,IK));
ECR = ymax - ymin;
WIK = IK; %Выводим данные прохода с минимумом EFK
end
%Запись на диск загружаемого массива исходной формы бандажа
save Wformbandm IN1
save Wformbandm -ascii IN1
disp('=====');
disp('ПРОГРАММА Working расчет закончен. ');
t2 = fix(clock);
disp('Старт'); disp(t1);
disp('Стоп'); disp(t2);
t3 = etime(t2,t1); %Время (в сек) работы программы
hour = floor( t3/3600 ); %Число полных часов
minute = floor( (t3-hour*3600)/60 ); %Число полных минут
second = t3 - hour*3600 - minute*60; %Остаток секунд
disp(sprintf( 'Время расчета часов=%g \n', hour));
disp(sprintf( ' минут=%g \n', minute));
disp(sprintf( ' секунд=%g\n', second));
disp('=====');

```



```

disp('Исходные данные:');
disp(['Имя файла исходного профиля - ',fnameFP]);
disp(sprintf('Расстояние между роликоопорами, мм=%g\n',aw));
disp(sprintf('Радиус ролика, мм=%g\n',rRL));
disp(sprintf('Положение инструмента между опорами, мм=%g\n',xos));
disp('Координата вершины инструмента, мм:');
disp(sprintf('начальная =%g конечная=%g\n',YR0,ymIn));
disp(sprintf('Глубина резания, мм=%g\n',tR));
disp(sprintf('Число проходов, =%g\n',KW ));
disp('Конструкция станка:');
switch TBace
case 1
disp('ДСС');%По обработанной поверхности
case 2
disp('УВС-М или СВК'); %По поверхности полученной при предыдущем проходе
case 3
disp('УВС-М или СВК');%По неизменяемой поверхности
end
disp('Базирование технологической базы станка:');
switch TBace
case 1
disp('по обработанной поверхности. ');
case 2
disp('по поверхности полученной при предыдущем проходе. ');
case 3
disp('по неизменяемой поверхности. ');
end
disp('=====');
disp('Результаты расчета:');
disp('Параметры индикаторной диаграммы. ');
disp('Экстремумы. ');
disp('для исходного профиля');
disp(sprintf(' ymIno мм=%g ymaXo мм=%g \n',ymIno,ymaXo));
disp(sprintf(' для профиля на проходе W=%g \n',WIK));
disp(sprintf(' ymIn мм=%g ymaX мм=%g \n',ymIn,ymaX));
disp(' Радиальное биение ECR. ');
disp(sprintf(' для исходного профиля ECR (мм)=%g \n',ECRo));
disp(sprintf(' для профиля на проходе W=%g \n',WIK));
disp(sprintf(' ECR(мм)=%g \n',ECR));
disp('.....');
disp('Параметры исправления погрешности формы бандажа. ');
disp('Отклонение от круглости. ');
disp(sprintf(' для исходного профиля EFKo(мм)=%g \n',IN4(1,2)));
disp(sprintf(' для профиля на проходе W=%g \n',WIK));
disp(sprintf(' EFK(мм)=%g \n',IN4(WIK,2)));
disp('Смещение координат центра концентрических окружностей. ');
disp('для исходного профиля');
disp(sprintf('DX_o(мм)=%g DY_o(мм)=%g\n',IN4(1,3),IN4(1,4)));
disp(sprintf(' для профиля на проходе W=%g \n',WIK));
disp(sprintf('DX_min(мм)=%g DY_min(мм)=%g\n',IN4(WIK,3),IN4(WIK,4)));
disp('Радиусы концентрических окружностей. ');
disp('для исходного профиля');
disp(sprintf(' R_mino(мм)=%g R_maxo(мм)=%g\n',IN4(1,5),IN4(1,6)));
disp(sprintf(' для профиля на проходе W=%g \n',WIK));
disp(sprintf(' R_min(мм)=%g R_max(мм)=%g\n',IN4(WIK,5),IN4(WIK,6)));
disp('.....');
disp('Путь к папке с результатами:'); cd;
disp('=====');
%Проверка формы бандажа
polar (fiS, rS) %Построение круглограммы профиля на последнем проходе
hold on
polar (fiS, rS1)%Построение исходного профиля на той же круглограмме
hold off
%Звуковое оповещение о завершении вычислений
xard=(0:0.1:250)*pi; yard=zeros(1,200);
zard=(0:0.1:1000)*pi;
sound([sin(xard),yard,sin(xard),yard,sin(xard),yard,sin(zard*4/5),yard,...
sin(xard*8/9),yard,sin(xard*8/9),yard,sin(xard*8/9),yard,sin(zard*3/4)]);
%При необходимости визуализации результатов расчета в табличном виде

```

```

%следует в окне Workspace открыть выбранный массив.
%Для построения графиков можно дополнительно использовать следующий список
%(команду для построения графика выбранной функции скопировать
%в Command Window и нажать Enter):
%Траектория центра т.О (хо и уо)
%plot(IN10(:,3),IN10(:,4))
%Изменение радиуса профиля для прохода с номером W. Здесь KW=W+1.
%plot(IN5(:,1),IN10(:,KW))
%Индикаторная диаграмма для прохода с номером W
%plot(IN7(:,1),IN7(:,W))

```

**Аудиовизуальные отображения, порождаемые программой**

**Результаты расчетов выводимые в командное окно при расчете с ТВасе=1:**

Исходные данные:

Имя файла исходного профиля - FormCam1  
 Расстояние между роликоопорами, мм=3175  
 Радиус ролика, мм=750  
 Положение инструмента между опорами, мм=1587.5  
 Координата вершины инструмента, мм:  
 начальная =323.415 конечная=324.315  
 Глубина резания, мм=0.05  
 Число проходов, =21  
 Конструкция станка:

ДСС

Базирование технологической базы станка:  
 по обработанной поверхности.

=====

Результаты расчета:

Параметры индикаторной диаграммы.

Экстремумы.

для исходного профиля

у<sub>тi</sub>но мм=323.415 у<sub>тa</sub>х<sub>о</sub> мм=325.166

для профиля на проходе W=19

у<sub>тi</sub>n мм=324.315 у<sub>тa</sub>х мм=324.33

Радиальное биение ECR.

для исходного профиля ECR (мм)=1.75109

для профиля на проходе W=19

ECR (мм)=0.0147741

.....

Параметры исправления погрешности формы бандажа.

Отклонение от круглости.

для исходного профиля EFK<sub>o</sub> (мм)=1.32906

для профиля на проходе W=19

EFK (мм)=0.380264

Смещение координат центра концентрических окружностей.

для исходного профиля

DX<sub>o</sub> (мм)=-1.8 DY<sub>o</sub> (мм)=1.8

для профиля на проходе W=19

DX<sub>min</sub> (мм)=-1.7 DY<sub>min</sub> (мм)=1.7

Радиусы концентрических окружностей.

для исходного профиля

R<sub>mino</sub> (мм)=2422.34 R<sub>махо</sub> (мм)=2423.67

для профиля на проходе W=19

R<sub>min</sub> (мм)=2422.02 R<sub>max</sub> (мм)=2422.41

=====

**Результаты расчетов выводимые в командное окно при расчете с ТВасе=2:**

Исходные данные:

Имя файла исходного профиля - FormCam1  
 Расстояние между роликоопорами, мм=3175  
 Радиус ролика, мм=750  
 Положение инструмента между опорами, мм=1587.5  
 Координата вершины инструмента, мм:  
 начальная =323.415 конечная=324.915  
 Глубина резания, мм=0.5  
 Число проходов, =5  
 Конструкция станка:

УВС-М или СВК

Базирование технологической базы станка:

по поверхности полученной при предыдущем проходе.

=====

Результаты расчета:  
 Параметры индикаторной диаграммы.  
 Экстремумы.  
 для исходного профиля  
 $u_{\min}$  мм=323.415  $u_{\max}$  мм=325.  
 для профиля на проходе W=4  
 $u_{\min}$  мм=324.915  $u_{\max}$  мм=324.915  
 Радиальное биение ECR.  
 для исходного профиля ECR (мм)=1.75109  
 для профиля на проходе W=4  
 ECR(мм)=0.000112931  
 Параметры исправления погрешности формы бандажа.  
 Отклонение от круглости.  
 для исходного профиля EFКo(мм)=1.32906  
 для профиля на проходе W=4  
 EFК(мм)=0.264277  
 Смещение координат центра концентрических окружностей.  
 для исходного профиля  
 $Dx_o$ (мм)=-1.8  $Dy_o$ (мм)=1.8  
 для профиля на проходе W=4  
 $Dx_{\min}$ (мм)=-1.7  $Dy_{\min}$ (мм)=1.7  
 Радиусы концентрических окружностей.  
 для исходного профиля  
 $R_{\min}$ (мм)=2422.34  $R_{\max}$ (мм)=2423.67  
 для профиля на проходе W=4  
 $R_{\min}$ (мм)=2421.86  $R_{\max}$ (мм)=2422.13  
 =====  
**Результаты расчетов выводимые в командное окно при расчете с ТВасе=3:**  
 Исходные данные:  
 Имя файла исходного профиля - FormCam1  
 Расстояние между роликоопорами, мм=3175  
 Радиус ролика, мм=750  
 Положение инструмента между опорами, мм=1587.5  
 Координата вершины инструмента, мм:  
 начальная =323.415 конечная=324.915  
 Глубина резания, мм=0.5  
 Число проходов, =5  
 Конструкция станка:  
 УВС-М или СВК  
 Базирование технологической базы станка:  
 по неизменяемой поверхности.  
 =====  
 Результаты расчета:  
 Параметры индикаторной диаграммы.  
 Экстремумы.  
 для исходного профиля  
 $u_{\min}$  мм=323.415  $u_{\max}$  мм=325.166  
 для профиля на проходе W=4  
 $u_{\min}$  мм=324.915  $u_{\max}$  мм=325.166  
 Радиальное биение ECR.  
 для исходного профиля ECR (мм)=1.75109  
 для профиля на проходе W=4  
 ECR(мм)=0.251095  
 .....  
 Параметры исправления погрешности формы бандажа.  
 Отклонение от круглости.  
 для исходного профиля EFКo(мм)=1.32906  
 для профиля на проходе W=4  
 EFК(мм)=0.432335  
 Смещение координат центра концентрических окружностей.  
 для исходного профиля  
 $Dx_o$ (мм)=-1.8  $Dy_o$ (мм)=1.8  
 для профиля на проходе W=4  
 $Dx_{\min}$ (мм)=-1.7  $Dy_{\min}$ (мм)=1.7  
 Радиусы концентрических окружностей.  
 для исходного профиля  
 $R_{\min}$ (мм)=2422.34  $R_{\max}$ (мм)=2423.67  
 для профиля на проходе W=4  
 $R_{\min}$ (мм)=2422.14  $R_{\max}$ (мм)=2422.58

Патенты на полезные модели и свидетельства о государственной  
регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ  
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ  
№ 162422

**СТАНОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ БАНДАЖЕЙ**

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015130983  
Приоритет полезной модели 24 июля 2015 г.  
Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 19 мая 2016 г.  
Срок действия патента истекает 24 июля 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности



Г.П. Ивлиев





## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 166871

**СТАНОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ БАНДАЖЕЙ И ОПОРНЫХ  
РОЛИКОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
БАРАБАНОВ**

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015155522

Приоритет полезной модели 23 декабря 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 23 ноября 2016 г.

Срок действия патента истекает 23 декабря 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев





## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 169072

**СТАНОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ БАНДАЖЕЙ И ОПОРНЫХ РОЛИКОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАРАБАНОВ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Шрубченко Иван Васильевич (RU), Хуртасенко Андрей Владимирович (RU), Мурыгина Людмила Викторовна (RU), Гончаров Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2016111590

Приоритет полезной модели 28 марта 2016 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 02 марта 2017 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 28 марта 2026 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017610999

Синтез формы бандажа технологического барабана с  
идентификацией отклонения от круглости по ГОСТ Р  
53442-2009

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Белгородский  
государственный технологический университет им. В.Г.  
Шухова» (RU)*

Авторы: *Шрубченко Иван Васильевич (RU), Хуртасенко Андрей  
Владимирович (RU), Гончаров Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2016662717

Дата поступления 23 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 19 января 2017 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017615862

Идентификация параметров движения бандажей  
технологических барабанов для организации их  
восстановительной обработки

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Шрубченко Иван Васильевич (RU), Хуртасенко Андрей Владимирович (RU), Гончаров Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2017612547

Дата поступления 28 марта 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 мая 2017 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017616010

**«Моделирование процесса восстановительной  
неуправляемой обработки переносными станками бандажей  
технологических барабанов»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Белгородский  
государственный технологический университет им. В.Г.  
Шухова» (RU)*

Авторы: *Шрубченко Иван Васильевич (RU), Хуртасенко Андрей  
Владимирович (RU), Гончаров Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2017612981

Дата поступления 05 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 мая 2017 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ившин



**Сведения о внедрении результатов работы**

Для предоставления в диссертационный Совет

**А К Т**

**внедрения результатов диссертационного исследования по теме:  
«Технологическое обеспечение параметров контакта опор  
вращающихся печей путем совершенствования мобильной технологии  
обработки поверхностей качения»**

Настоящим удостоверяем, что рекомендации, содержащиеся в диссертационном исследовании Гончарова Михаила Сергеевича использовались ООО «ЦемСервис» при проведении работ по обработке поверхностей бандажей и роликов вращающихся печей №1, 5 и 6 ЗАО «Осколцемент», что позволило существенно повысить качество и производительность.

Работы на опорах печи № 1 проводились при непосредственном участии Гончарова М.С.

Экономический эффект в расчете на одну вращающуюся печь составил около 700 тыс. рублей.

Технический директор  
ООО «ЦемСервис»



А.В. Каспаров