



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Технология механической обработки, цифровое моделирование и реализация устройства для контроля формы крупногабаритных деталей





Сергей Тимофеев^{1, а}, Анна Гринек^{2, b, *}, Андрей Хуртасенко^{3, c}, Игорь Бойчук^{2, d}

¹ Общество с ограниченной ответственностью «Промагро», Ржевское шоссе 370а, г. Шебекино, Белгородская область, 309290, Россия

² Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353918, Россия

³ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, г. Белгород, 308012, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-6740-5163>,  timofoevsp@inbox.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0001-7953-3501>,  grinyokann@gmail.com,

^с  <https://orcid.org/0000-0002-2614-5457>,  hurtintbel@mail.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0002-1996-2184>,  boychuk@ieec.org

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.01

История статьи:

Поступила: 16 февраля 2022

Рецензирование: 14 марта 2022

Принята к печати: 23 марта 2022

Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:

Цифровое моделирование
 Крупногабаритные детали
 Бандаж
 Измерение формы
 Механическая обработка

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка способа контроля параметров точности крупногабаритных тел вращения представляет собой актуальную задачу, которая решается специалистами из различных отраслей. Возникновение погрешностей формы связано не только с большими габаритами и массами, но и условиями базирования самих агрегатов, при которых положение оси вращения непостоянно. Показано применение методики для коррекции механической обработки на основе измерения параметров формы поверхности непосредственно в процессе обработки. **Цель работы:** совершенствование мобильных технологий обработки с использованием специальных измерительных устройств и обрабатывающих модулей. Для этого решены задачи разработки и анализа математических моделей, описывающих процесс базирования и механической обработки бандажа как цилиндрического объекта с нестационарной осью вращения. Предлагаемая методика исследована, разработаны схемы контроля и реализовано оборудование для мобильной механической обработки. **Методами исследования** являются анализ разработанных математических моделей с позиции назначения эффективных технологических режимов, имитационное моделирование обработки, программно-аппаратная реализация предложенных решений, статистическая обработка результатов измерений. **Результаты и обсуждение.** Алгоритм и методика протестированы с помощью имитационной трехмерной модели. Представленная методика измерений и расчета припуска для восстановительной обработки позволяет сократить время обработки по сравнению с технологией с активным контролем формы и по сравнению с традиционной методикой назначения припуска для обработки. Измерение и корректировка припуска на основе данных измерения производятся не после каждого измерения, а только в случае перехода к чистовым переходам или для контроля процесса выполнения. Определено, что при обеспечении единой технологической базы на каждый отдельный технологический переход в рамках мобильной технологии механической обработки поверхности катания бандажей технологических барабанов повышается точность и скорость обработки. Разработана оригинальная конструкция устройства для контроля параметров, изготовлена экспериментальная установка и лабораторная модель бандажа.

Для цитирования: Технология механической обработки, цифровое моделирование и реализация устройства для контроля формы крупногабаритных деталей / С.П. Тимофеев, А.В. Гринек, А.В. Хуртасенко, И.П. Бойчук // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 6–24. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24.

Введение

В ряде отраслей промышленности применяются крупногабаритные трубчатые, барабанные вращающиеся агрегаты длиной от нескольких десятков до нескольких сотен метров [1, 2]. Их

характерной особенностью является единый принцип работы, заключающийся в безостановочном перемещении больших масс материала с параллельной его обработкой: нагревом, измельчением, промывкой [3, 4]. Разработка способа контроля параметров точности крупногабаритных тел вращения представляет собой актуальную задачу, которая решается специалистами различных отраслей [5]. Возникновение погрешностей формы связано не только с большими габаритами и массами, но и условиями базирова-

*Адрес для переписки

Гринек Анна Владимировна, к.т.н., доцент
 Государственный морской университет
 им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,
 пр. Ленина, 93,
 353918, г. Новороссийск, Россия
 Тел.: +7-960-637-38-82, e-mail: grinyokann@gmail.com

ния самих агрегатов, при которых положение оси вращения непостоянно. Данный фактор также обуславливает специфику выполнения работ по обеспечению точности формы данных поверхностей путем механической обработки во время технологического вращения агрегата [6, 7]. Актуальной задачей является разработка технологии обеспечения точности формы поверхности катания бандажей, для которой возможен расчет режимов и прогнозирование результата обработки. Важным является применение для данной технологии активных методов управления процессом обработки на основе измерения параметров точности поверхности непосредственно в процессе обработки. При этом наиболее актуальными являются вопросы моделирования и расчета режимов процесса обработки на основе данных, полученных после измерения [8]. Внедрение технологии механической обработки роликов и бандажей цементных печей и элементов любых крупногабаритных конструкций требует разработки и изготовления специальных средств оснащения, а именно измерительного устройства и обрабатывающего модуля [9].

Максимально полная информация о сложной технической системе, полученная на основании математического моделирования и измерения, является базой для проектирования автоматизированных и регулируемых технологических процессов [10–12].

Решения в области измерения цилиндрических деталей и вычисления погрешности формы [13–16] в условиях неопределенности базирования, сложных эксплуатационных условиях основаны на статистических и детерминированных математических моделях, описывающих цилиндрические тела в статике и динамике. Существуют математические модели, описывающие поведение элементов цементной печи (бандажа, опорных роликов) и подобных агрегатов и механизмов на основании различных подходов и допущений [17–19].

Существуют бесконтактные системы измерения [20–22], позволяющие повысить точность измерений в условиях вибраций и запыленности цементного производства, использующие лазерные методы исследования.

Кроме того, есть потребность в разработке соответствующего программного обеспечения для данных устройств. Очевидно, что для этого

требуются значительные временные и финансовые затраты. Поэтому для первоначального анализа эффективности и применимости предложенной технологии должна быть произведена её апробация с использованием виртуального моделирования или цифрового двойника процесса механической обработки бандажа.

Цель данной работы – совершенствование мобильных технологий обработки с использованием специальных измерительных устройств и обрабатывающих модулей. Это позволит существенно увеличить межремонтный цикл эксплуатации и сократить затрачиваемое время на проведение механической обработки крупногабаритных деталей – тел вращения.

Задачи исследования – разработка и анализ математических моделей, описывающих процесс базирования и механической обработки бандажа как цилиндрического объекта с нестационарной осью вращения, исследование предлагаемой методики, разработка схем контроля и реализация оборудования для мобильной механической обработки.

Методика исследований

В ходе выполнения работы реализован полный цикл действий с использованием оригинального способа контроля: от определения параметров точности формы до моделирования процесса обработки по рассчитанному маршруту.

Бандаж – крупногабаритное цилиндрическое тело с нестационарной осью вращения. В процессе технической эксплуатации он базируется на опорных роликах, при этом у агрегата отсутствует ось вращения. Как правило, ролики устанавливаются под углом 60° относительно оси печи. В зависимости от протяженности и массы такого технологического барабана количество опор может варьироваться от 2 до 8–10 штук.

Во время ремонтной механической обработки или контроля формы (без демонтажа агрегата) схема базирования не изменяется, при этом обрабатывающий модуль с инструментом устанавливается на обрабатываемой поверхности, и реализуется бесцентровая схема обработки. Проведение механической обработки опорных элементов вращающихся цементных печей по одной из существующих технологий назначает-

ся после выявления превышающей нормативные величины погрешности формы данных деталей.

Для виртуальной модели были взяты параметры формы поверхности катания бандажей эксплуатируемых печных агрегатов. Это позволило провести сравнительный анализ используемых технологий механической обработки. Непосредственно принятая для модели поверхность катания (рис. 1) имеет номинальный диаметр 6,1 м, ширину 1 м с величиной полного радиального биения около 12 мм и бочкообразным профилем продольного сечения. Построение виртуальной

модели бандажа и устройств было выполнено в системе автоматизированного проектирования Siemens NX.

Расчет технологического припуска механической обработки требует данных о параметрах точности формы всей обрабатываемой поверхности. Представленная ниже методика измерения с трехмерной цифровой реконструкцией и реализованное измерительное устройство обеспечивают точность формы бандажей технологических барабанов непосредственно в процессе технологического вращения агрегатов.

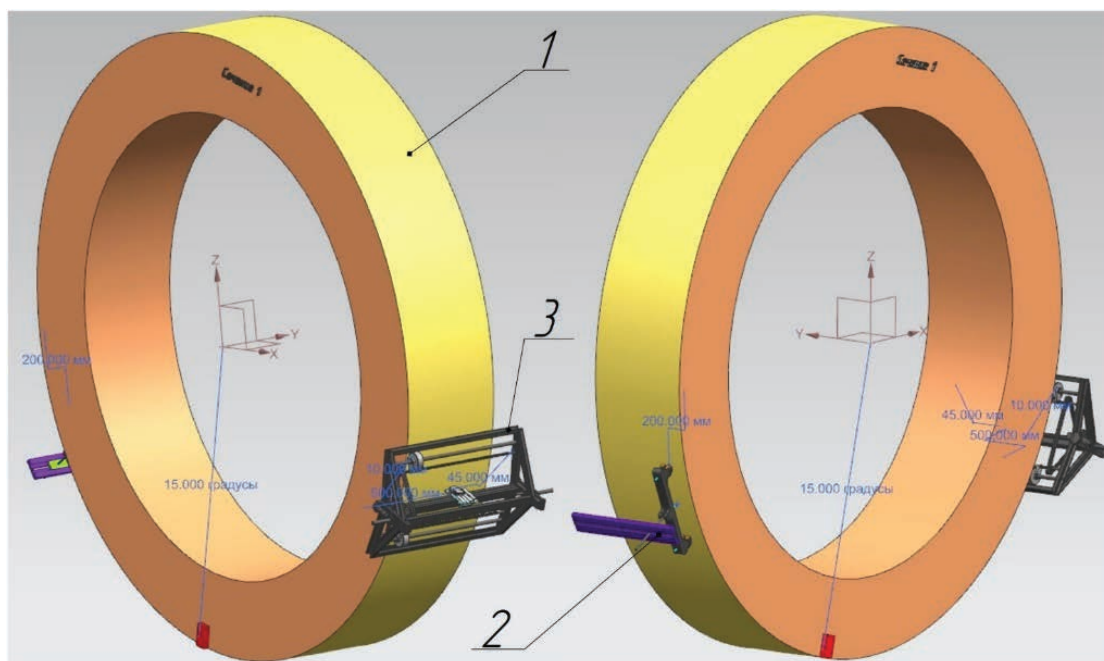


Рис. 1. Виртуальная модель бандажа и установленные для проведения обработки виртуальные модели измерительного устройства и обрабатывающего модуля:

1 – модель бандажа; 2 – измерительное устройство; 3 – обрабатывающий модуль

Fig. 1. Virtual model of the riding ring and the virtual models of the measuring device and the processing module installed for processing:

1 – model of the riding ring; 2 – measuring device; 3 – processing module

При разработке маршрута механической обработки исследовалась возможность исправления точности формы поверхности до нормативных величин согласно отраслевым стандартам – величина отклонения реального профиля всей поверхности от вписанного в нее цилиндра $\Delta_{TFZ}^{норм} = 3,05$ мм, с использованием ленточно-абразивного способа и минимизацией припуска на обработку (удаления припуска до размеров вписанного цилиндра).

Математические модели для технологии механической обработки и моделирование механической обработки

Расчет траектории движения независимого опорного устройства копирования (далее НОУК)

Алгоритм расчета положения НОУК при перемещении его по контуру базового сечения выглядит следующим образом (рис. 2):

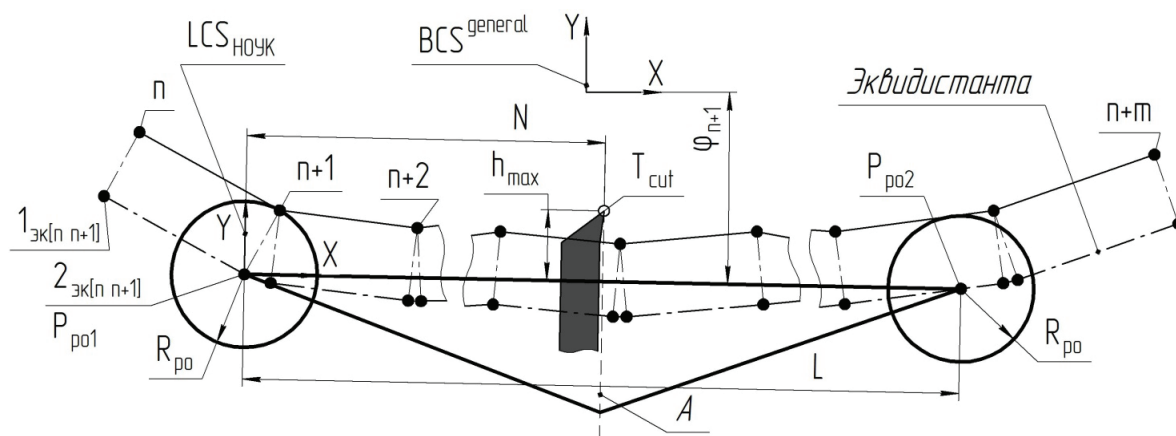


Рис. 2. Принципиальная схема расчета положения обрабатывающего модуля (A – линия, соответствующая оси перемещения кромки режущего инструмента)

Fig. 2. Schematic diagram of the calculation of the processing module position (A – line corresponding to the axis of movement of the cutting tool edge)

– ось первого опорного ролика НОУК (точка P_{po1}) совмещается с $n_{эк}$ -й точкой полученной ранее эквидистанты;

– рассчитывается положение второго опорного ролика НОУК (точка P_{po2}) на эквидистанте;

– рассчитывается угол поворота локальной системы координат НОУК $LCS_{НОУК}$ относительно $BCS^{general}$;

– определяется уравнение прямой, проходящей через точку вершины режущего инструмента параллельно плоскости его перемещения;

– алгоритм повторяется для всех точек эквидистанты.

Для нахождения угла поворота локальной системы координат НОУК ($LCS_{НОУК}$, рис. 2) в $BCS^{general}$ необходимо определить положение точки P_{po2} для каждого положения.

Формулы расчета угла поворота $LCS_{НОУК}$ относительно $BCS^{general}$ для m -го положения НОУК с известными координатами точек P_{po1} и P_{po2} :

$$\varphi_m = \arctg \left(\frac{y_{P_{po2_m}} - y_{P_{po1_m}}}{x_{P_{po2_m}} - x_{P_{po1_m}}} \right) \quad (1)$$

при $x_{P_{po2_m}} - x_{P_{po1_m}} > 0$;

$$\varphi_m = 0 \text{ при } x_{P_{po2_m}} - x_{P_{po1_m}} > 0 \quad (2)$$

и $y_{P_{po2_m}} - y_{P_{po1_m}} = 0$;

$$\varphi_m = \arctg \left(\frac{y_{P_{po2_m}} - y_{P_{po1_m}}}{x_{P_{po2_m}} - x_{P_{po1_m}}} \right) + \pi \quad (3)$$

при $x_{P_{po2_m}} - x_{P_{po1_m}} < 0$;

$$\varphi_m = \pi \text{ при } x_{P_{po2_m}} - x_{P_{po1_m}} < 0 \quad (4)$$

и $y_{P_{po2_m}} - y_{P_{po1_m}} = 0$;

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2} \text{ при } x_{P_{po2_m}} - x_{P_{po1_m}} = 0 \quad (5)$$

и $y_{P_{po2_m}} - y_{P_{po1_m}} > 0$;

$$\varphi_m = -\frac{\pi}{2} \text{ при } x_{P_{po2_m}} - x_{P_{po1_m}} = 0 \quad (6)$$

и $y_{P_{po2_m}} - y_{P_{po1_m}} < 0$,

где $x_{P_{po1_m}}$ и $y_{P_{po1_m}}$ – координаты точки P_{po1} в $BCS^{general}$ для m -го положения НОУК; $x_{P_{po2_m}}$ и $y_{P_{po2_m}}$ – координаты точки P_{po2} в $BCS^{general}$ для m -го положения НОУК.

При известных координатах точки оси опорного ролика P_{po1} , конструктивных параметрах НОУК и угле φ_m , соответствующего повороту $LCS_{НОУК}$ относительно $BCS^{general}$, геометрические координаты крайней точки режущей части инструмента P_{cut} (далее точка резания) в $BCS^{general}$ находятся по формуле

$$\begin{pmatrix} x_{P_{cut_m}} \\ y_{P_{cut_m}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{P_{po1_m}} \\ y_{P_{po1_m}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\varphi_m) - \sin(\varphi_m) \\ \sin(\varphi_m) \cos(\varphi_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ h_{max} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $x_{P_{cut_m}}$ и $y_{P_{cut_m}}$ – координаты точки P_{cut} в $BCS^{general}$ для m -го положения НОУК.

Тогда расчет уравнения прямой, проходящей через известную точку P_{cut} по оси перемещения режущего инструмента в текущем положении НОУК (линия A , рис. 2), осуществляется по формуле

$$y = k(x - x_{P_{cut_m}}) + y_{P_{cut_m}}, \quad (8)$$

где k – коэффициент угла наклона прямой, определяемый по формуле

$$k = \operatorname{tg} \left(\varphi_m + \frac{\pi}{2} \right). \quad (9)$$

Для случая, когда $\varphi_m + \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2}$, уравнение прямой соответствует формуле

$$x = x_{P_{cut_m}}. \quad (10)$$

Расчет траектории движения НОУК

Исправление точности форм поверхности с одновременным обеспечением условий снятия максимального припуска и отсутствия зарезания поверхности до вписанного кругового цилиндра на каждом переходе осуществляется за счет расчета предельной величины вылета режущего инструмента на переход $h_{p_max}^I$ (где I – порядковый номер перехода). Определение величины $h_{p_max}^I$ производится на основе расчета траектории перемещения НОУК по контуру базового сечения поверхности и данных о параметрах вписанного цилиндра (рис. 3).

Алгоритм расчета $h_{p_max}^I$ представляет собой следующую последовательность.

1. Вычисляется точка пересечения прямой, соответствующей оси перемещения режущего

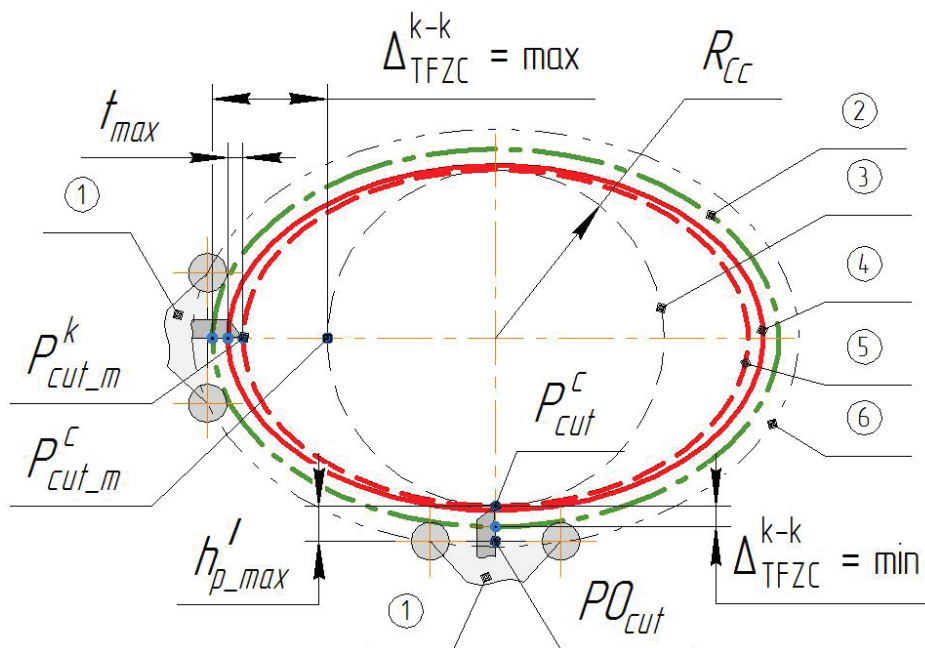


Рис. 3. Принципиальная схема к расчету $h_{p_max}^I$ на переход:

1 – обрабатывающий модуль; 2 – контур базового сечения; 3 – контур вписанного кругового цилиндра; 4 – контур поверхности до механической обработки на текущем переходе; 5 – контур поверхности после механической обработки для текущего перехода; 6 – эквидистанта к контуру базового сечения; $k-k$ – участок поверхности, соответствующий технологической базе

Fig. 3. Schematic diagram for the calculation $h_{p_max}^I$ of the transition:

1 – processing module; 2 – contour of the base section; 3 – contour of the inscribed circular cylinder; 4 – contour of the surface before machining at the transition; 5 – contour surface after machining for a wide transition; 6 – equidistant to the contour of the technological section; $k-k$ – surface area suitable for this base

инструмента в текущем положении НОУК (уравнение (8)), с контуром сечения вписанного кругового цилиндра $P_{cut_m}^C$.

2. Вычисляется расстояние от точки $P_{cut_m}^C$ до нулевой точки $P0_{cut_m}$ НОУК (точка, в которой принят вылет режущего инструмента $h_p^I = 0$). Расчет производится по формуле

$$h_{p_m}^I = \sqrt{(x_{P_{cut_m}} - x_{P0_m})^2 + (y_{P_{cut_m}} - y_{P0_m})^2}, \quad (11)$$

где $x_{P_{cut_m}}$ и $y_{P_{cut_m}}$ – координаты точки $P0_{cut_m}$ в $BCS^{general}$ для m -го положения НОУК, определяемые по формуле

$$\begin{pmatrix} x_{P0_{cut_m}} \\ y_{P0_{cut_m}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{P_{pol_m}} \\ y_{P_{pol_m}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\varphi_m) - \sin(\varphi_m) \\ \sin(\varphi_m) \cos(\varphi_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

3. Из полученных расстояний выбирается минимальное по величине значение и назначается как $h_{p_max}^I$.

4. Производится расчет точек P_{cut}^k для всех положений НОУК при величине вылета режущего инструмента, равной $h_{p_max}^I$. По полученным точкам P_{cut}^k строится B-сплайн, определяющий максимально достижимую форму контура сечения поверхности после механической обработки на данном переходе (линия 5, рис. 4). Расчетная величина $h_{p_max}^I$ определяет максимальный снимаемый припуск на I -м переходе, обеспечивающий механическую обработку поверхности до размеров вписанного кругового цилиндра (без зарезаний).

Расчет максимальной глубины врезания

Из принятой схемы обработки и стратегии назначения рабочих ходов следует, что фактическая глубина резания является величиной переменной и зависит от траектории перемеще-

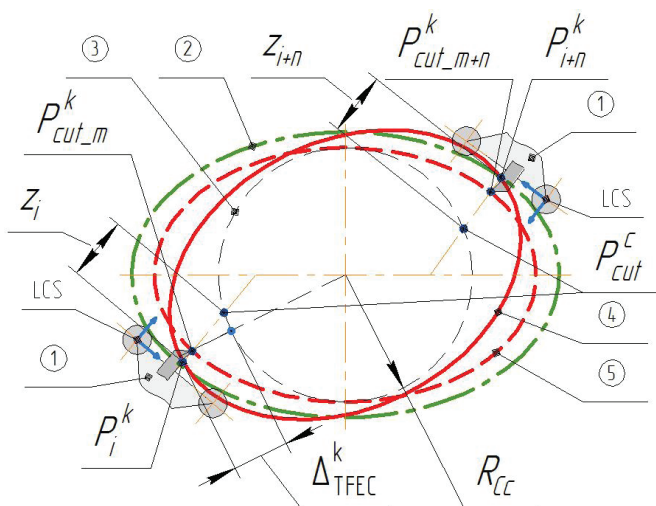


Рис. 4. Принципиальная схема расчета глубины резания в k -м сечении:

1 – обрабатывающий модуль; 2 – контур базового сечения; 3 – контур вписанного кругового цилиндра; 4 – контур поверхности до механической обработки на текущем переходе; 5 – расчетный контур поверхности после механической обработки для текущего перехода; z_i – расчетный максимальный припуск на механическую обработку для текущего перехода и положения НОУК

Fig. 4. Schematic diagram of calculating the depth of cut in the k -th section:

1 – processing module; 2 – base section contour; 3 – inscribed circular cylinder contour; 4 – surface contour before machining at the current transition; 5 – calculated surface contour after machining for the current transition; z_i – is the calculated maximum machining allowance for the current transition and the position of the NOUK

ния НОУК по базовому участку поверхности, а также от искажения формы поверхности в обрабатываемом сечении. В связи с этим возможно превышение предельно допустимой глубины резания t_{max}^{per} (*per.* – *permissible*), при котором произойдет выход из строя режущего инструмента и/или обрабатывающего модуля. Для предотвращения указанного случая необходим расчет максимально достигаемой глубины резания t_{max}^k (рис. 4) в каждом k -м поперечном сечении зоны обработки для текущих параметров предельной величины вылета режущего инструмента $h_{p_max}^I$ на технологический переход.

Расчет величины t_{max}^k в k -м сечении на основе приведенной ранее модели процесса формообразования (пункт) производится по нижеприведенному алгоритму.

Вычисление точек врезания инструмента для каждого из положений НОУК

Вычисляются координаты точки P_i^k (рис. 4), соответствующей пересечению прямой, вдоль которой осуществляется перемещение режущего инструмента (уравнение (8)), с контуром поперечного сечения поверхности 4 (рис. 4), до обработки для каждого из известных положений НОУК, полученных при расчете $h_{p_max}^I$.

Каждой точке $P_{cut_m}^k$ должна соответствовать только одна точка P_i^k , однако в общем случае решение имеет две точки пересечения прямой (уравнение (8)) и контура обрабатываемого сечения поверхности 4 (рис. 4). Поэтому для дальнейших расчетов принимается точка, для которой модуль расстояния от точки P_{cut}^k наименьший.

Результаты и их обсуждение

Определение параметров точности формы виртуальной модели бандажа

Для определения параметров точности формы поверхности катания виртуальной модели бандажа была произведена ее виртуальная ре-

конструкция на основе измерения 6 поперечных сечений. Каждое сечение отстоит от соседнего на расстоянии 200 мм, при этом крайние сечения совпадают с ребрами модели.

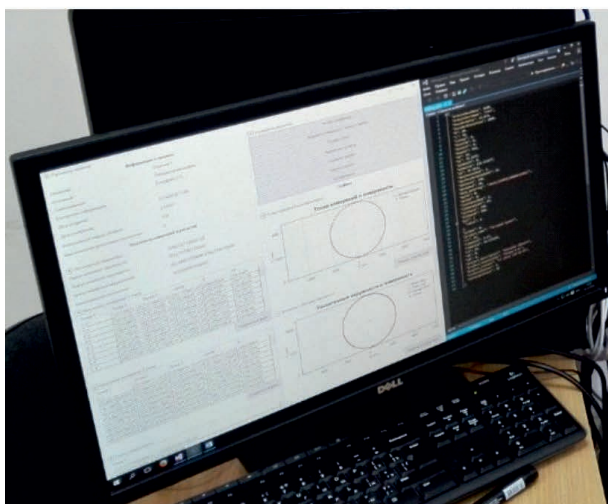
Для экспериментальных измерений и проверки работоспособности решений использовалась параметризованная виртуальная модель измерительного устройства (см. рис. 1), соответствующая оригинальной принципиальной запатентованной схеме измерительного устройства, а также программный модуль (рис. 5), реализующий алгоритм расчета параметров точности формы поперечного сечения.

На рис. 6 представлены расчетные распределения величины Δ_{TFEC}^k для сечений с максимальной и минимальной величиной погрешности формы.

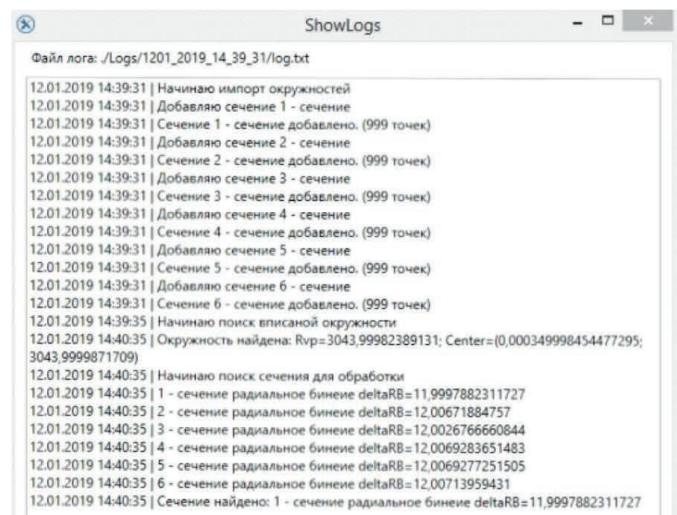
Совмещенная диаграмма контуров сечений и вписанного цилиндра показана на рис. 7. Полученные расчетные данные по параметрам точности формы поверхности катания используются для дальнейшего анализа и разработки маршрута механической обработки.

Построение маршрута механической обработки

Согласно предложенной технологии первоначально произведен анализ обрабатываемой поверхности по полученным на этапе измерения



а



б

Рис. 5. Программная реализация алгоритма расчета формы:

а – пользовательский интерфейс программы; б – окно лога при расчете параметров формы поверхности

Fig. 5. Software implementation of the shape calculation algorithm:

а – program user interface; б – log window when calculating surface shape parameters

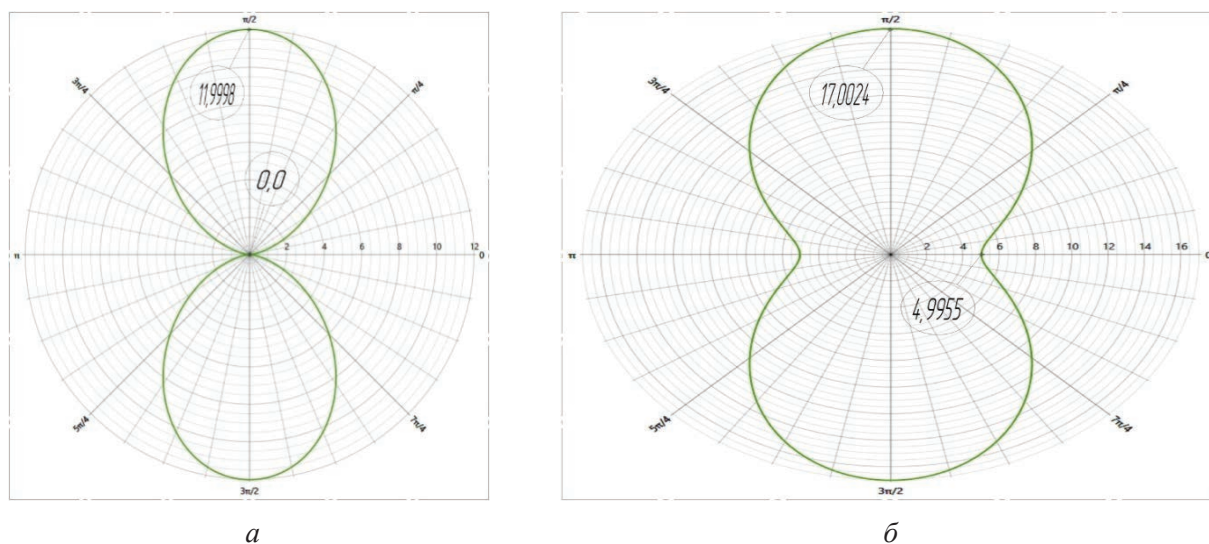


Рис. 6. Круглограммы распределения погрешности формы поверочных сечений:

a – сечение № 1; *б* – сечение № 4

Fig. 6. Round diagrams of the shape deviation distribution of the verification sections:

a – section No. 1; *б* – section No. 4

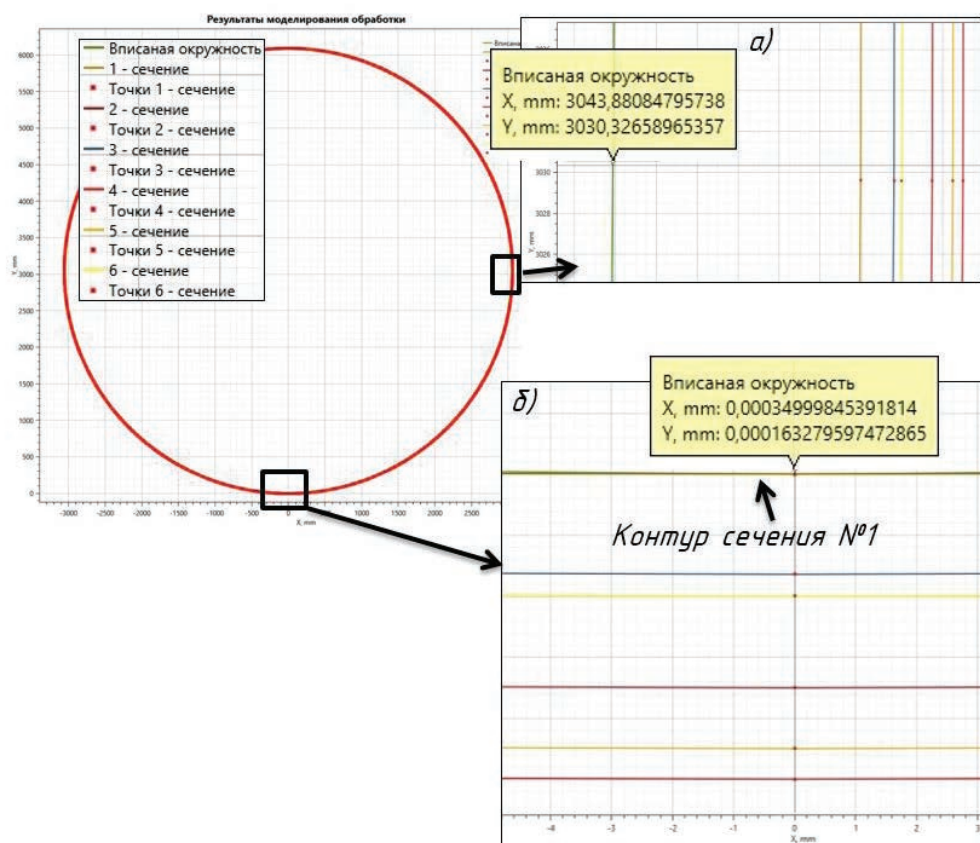


Рис. 7. Совмещенная диаграмма контуров сечений и вписанного цилиндра:

a – участок графика в районе минимальной погрешности формы поверхности; *б* – участок графика в районе максимальной погрешности формы поверхности

Fig. 7. Combined diagram of the contours of the sections and the inscribed cylinder:

a – plot of the graph in the region of the minimum error in the shape of the surface; *б* – plot of the graph in the region of the maximum error in the shape of the surface

данным о ее геометрических параметрах точности формы.

Из анализа данных следует, что сечение № 1 имеет наименьшую величину параметра Δ_{ECR}^1 , а также Δ_{TFEC}^1 . При этом сечение № 2 имеет одну из наименьших погрешностей формы. Тем самым согласно предложенной схеме обработки в качестве возможного участка поверхности для базирования обрабатывающего модуля принимается участок поверхности от сечения № 1 к сечению № 2. При этом ввиду принятой ширины опорных роликов обрабатывающего модуля для основной технологической базы на первом переходе принят участок шириной 100 мм от сечения № 1. Далее данный участок обозначен как 1-М.

В процессе 1-го технологического перехода обрабатывающий модуль базируется по необработанной поверхности, а так как профиль продольного сечения на данном участке имеет непрямолинейные образующие, то расчетная траектория перемещения НОУК будет отличаться от фактической. Поэтому для маршрута механической обработки приняты следующие правила.

Расчет траектории перемещения НОУК необходимо производить по сечению основной технологической базы с минимальной величиной Δ_{TFEC}^k . По данному сечению также рассчитывается $h_{p_max}^I$.

При расчете величин $h_{pG}^{I,k-k}$ для исключения возможности превышения максимально допустимой величины t_{max}^{per} в случае сильного износа поверхности катания бандажа необходимо соответствующее уменьшение t_{max}^{per} .

После выполнения 1-го перехода следует выполнить операцию определения геометрических параметров точности формы обработанных участков поверхности и произвести корректировку расчета маршрута механической обработки по полученным данным.

В целях сокращения основного технологического времени обработки рациональным является проведение механической обработки двух небольших и смежных участков поверхности (участки 1-М и М-2) до получения на одном из них требуемых параметров точности формы.

После получения участка поверхности с требуемой величиной погрешности формы она принимается за основную технологическую базу для обработки всей оставшейся поверхности. Тем самым на 1-м переходе произведен расчет и моделирование обработки смежного основной технологической базе участка поверхности шириной 100 мм – М-2 (рис. 8).

Согласно расчету параметров технологических режимов маршрута механической обработки в разработанном программном обеспечении для 1-го перехода максимальная глубина резания t_{k_max} обрабатываемого участка 1-М составила 2,247 мм с $h_{p_max}^I = 56,21$ мм. При этом величина Δ_{ECR}^2 обработанного участка должна уменьшиться на 0,48 мм и составить $\Delta_{ECR}^2 = 11,527$ мм.

По результатам виртуального моделирования процесса механической обработки в САПР NX для величины $h_{p_max}^I$ с последующим определением геометрических параметров точности формы максимальная глубина резания t_{k_max} составила 1,957 мм (рис. 9, а). Величина Δ_{ECR}^2 обработанного участка уменьшилась на 0,34 мм и составила $\Delta_{ECR}^2 = 11,667$ мм (рис. 9, б). Соответственно фактические выходные параметры геометрической точности формы обработанного участка 1-М незначительно хуже расчетных. Полученные данные переданы для корректировки маршрута механической обработки.

Расчет и моделирование процесса обработки показали, что применение предложенной схемы обработки позволяет на каждом отдельном переходе исправлять геометрическую точность формы только до конечной величины. Так, например, на 2-м переходе максимально достигаемая величина Δ_{ECR}^1 обрабатываемого участка 1-М составила 11,365 мм (рис. 10, а). При этом в случае превышения величины $h_{p_max}^2$ более расчетной наблюдается уменьшение радиуса вписанного цилиндра R_{Cc} .

Дальнейший маршрут обработки также предполагал обработку двух смежных участков поверхности 1-М и М-2 между сечениями №1 и №2

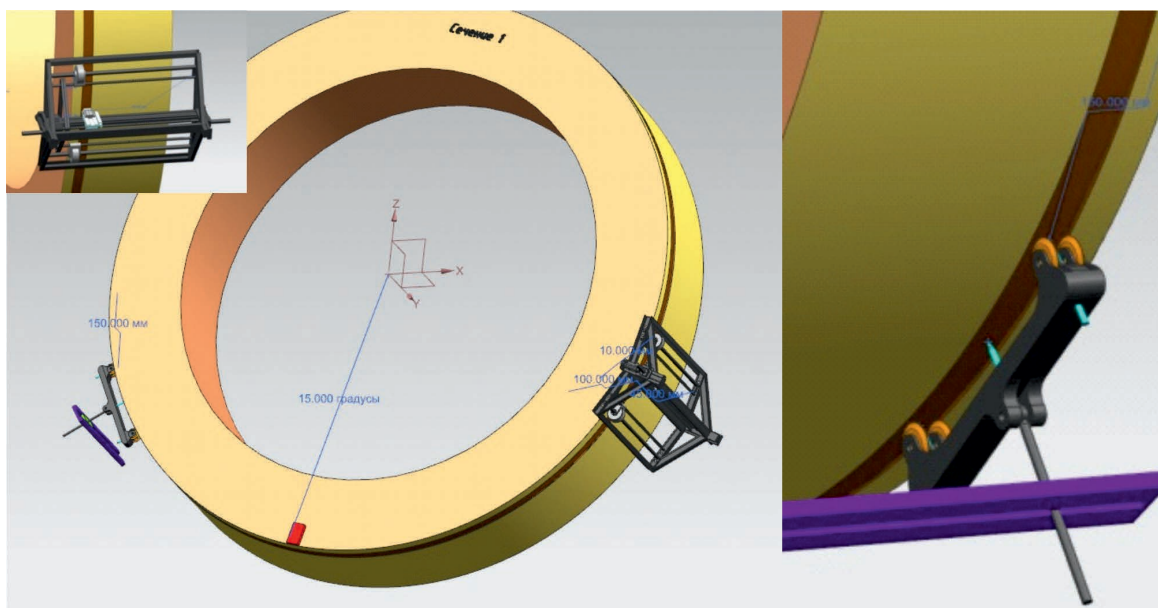


Рис. 8. Результат моделирования механической обработки после 1-го перехода

Fig.8. Machining simulation result after first transition

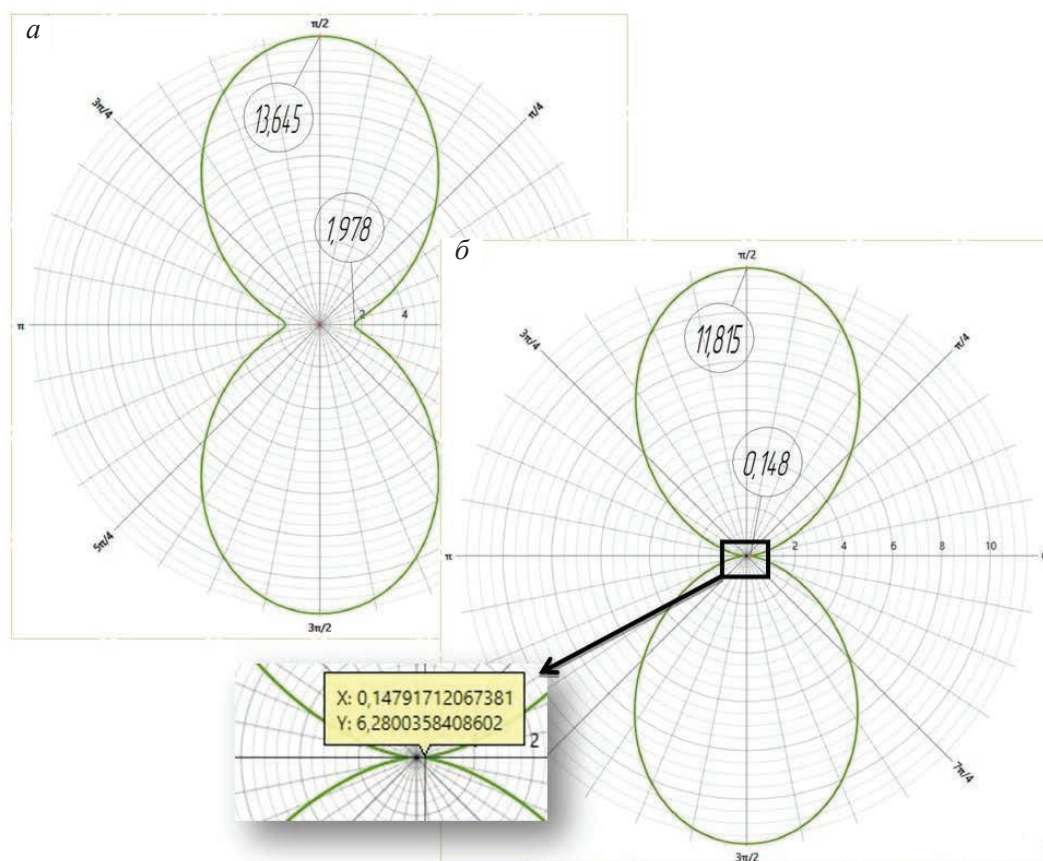


Рис. 9. Круглограмма погрешности формы контура обработанного участка поверхности на 1-м переходе:

a – до обработки; *б* – после обработки

Fig. 9. Round diagram of the shape deviation of the contour of the processed surface area at the 1st transition:

a – before processing; *б* – after processing

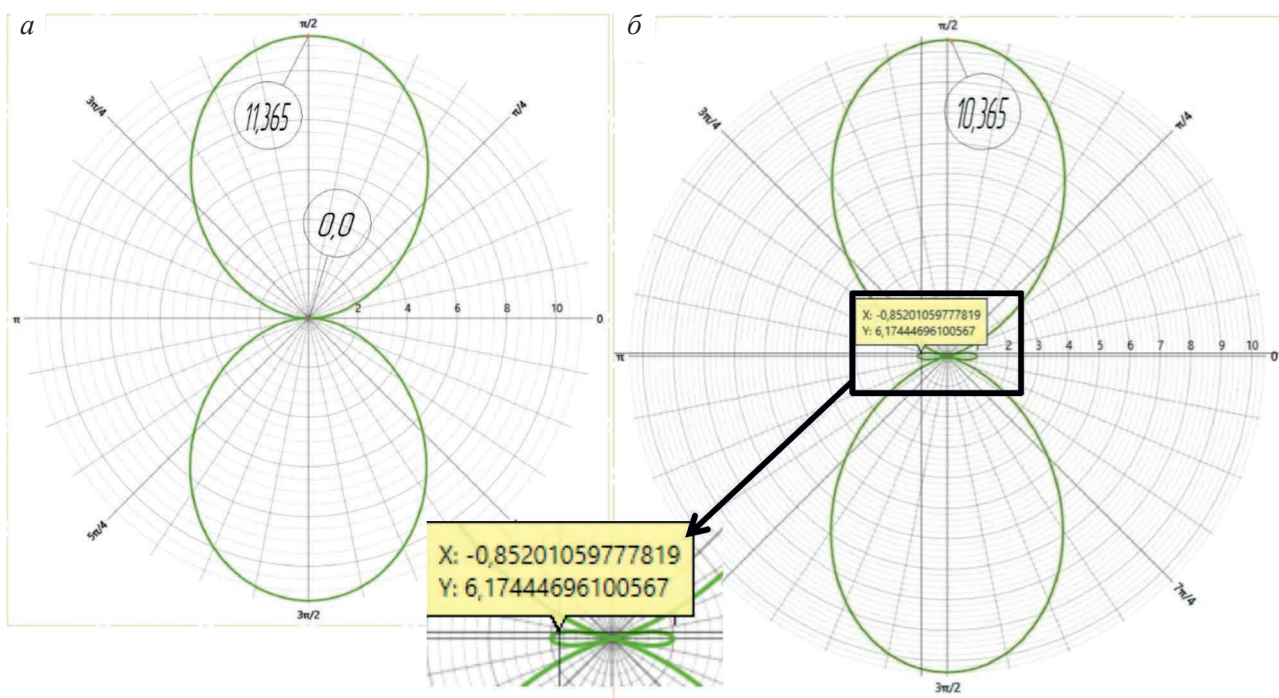


Рис. 10. Круглограмма погрешности формы контура поперечного сечения обработанного участка после 2-го перехода:

$$a - h_{p_max}^2 = 56,2 \text{ мм}; \quad b - h_{p_max}^2 = 57,2 \text{ мм}$$

Fig. 10. Round diagram of the shape deviation of the cross-sectional contour of the machined area after the 2nd transition:

$$a - h_{p_max}^2 = 56,2 \text{ mm}; \quad b - h_{p_max}^2 = 57,2 \text{ mm}$$

до достижения нормативной величины Δ_{ECR}^k . При этом перед каждым технологическим переходом производилась смена основной технологической базы на обработанный на предыдущем переходе участок (с минимальной величиной Δ_{ECR}^k).

Согласно произведенным расчетам нормативная величина радиального биения достигается на участке М-2 за 51 технологический переход (согласно ОСТ 22-170-87 для сварного бандажа цементной печи диаметром Ø6,1 м величина $\Delta_{ECR}^{нормат} = 3,04$ мм). После выполнения 51-го перехода на участке М-2 величина $\Delta_{ECR}^{M-2} = 2,998$ мм, а на участке 1-М величина $\Delta_{ECR}^{1-M} = 3,082$ мм. Тем самым участок поверхности М-2 далее будет использован для последнего технологического перехода, предполагающего механическую обработку всей оставшейся части поверхности. На рис. 11 представлен гра-

фик изменения величины Δ_{ECR}^k поперечных сечений обрабатываемых участков поверхности 1-М и М-2 с 1-го по 51-й включительно переход.

Перед выполнением последнего перехода произведена операция по определению геометрических параметров точности формы участка поверхности М-2, принимаемого в качестве основной технологической базы для 52-го перехода. Необходимость выполнения данной операции обусловлена тем, что в случае превышения фактической величины погрешности формы на данном участке возможно недостижение требуемых параметров геометрической точности формы поверхности катания за расчетное количество рабочих ходов на последнем переходе.

По результатам виртуального моделирования процесса механической обработки в САПР NX сделан вывод, что фактические параметры геометрической точности формы участка М-2 соответствуют расчетным. Тем самым корректировка маршрута механической обработки не потребовалась.

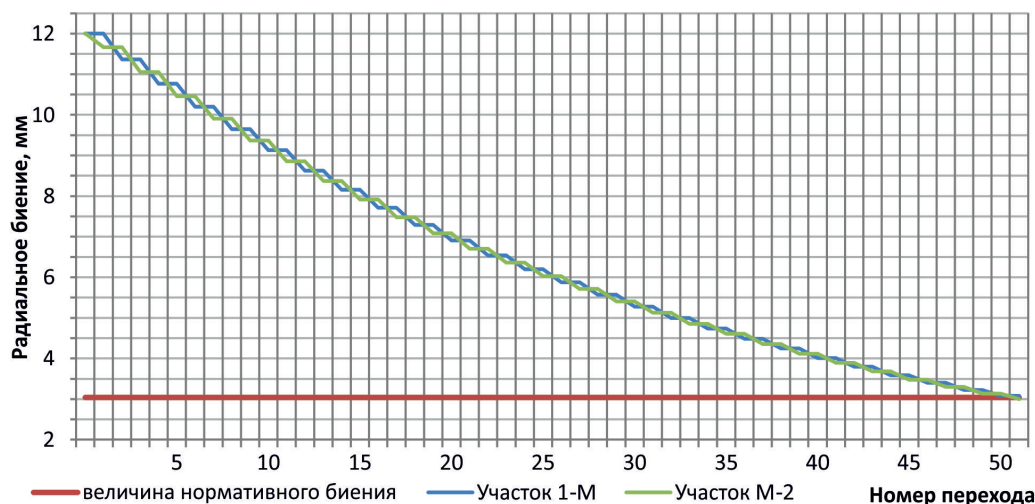


Рис. 11. График изменения величины Δ_{ECR}^k поперечных сечений обрабатываемых участков поверхности 1-М и М-2 с 1-го по 51-й включительно переход

Fig. 11. Graph of the change in the Δ_{ECR}^k value of the cross sections of the processed surface areas 1-M and M-2 from the 1st to the 51st transition inclusive

Согласно расчетам на 52-м переходе для обеспечения нормативной точности формы всей оставшейся поверхности требуется произвести 14 рабочих ходов, характеризующихся различной величиной вылета режущего инструмента для каждого участка поверхности. При этом для обеспечения требуемого качества поверхности (R_a 6,3...12,5 мкм) введен 15-й рабочий ход, на котором глубина обработки составила 0,07 мм.

На рис. 12 представлено расчетное распределение максимального припуска на обработку

для каждого обрабатываемого участка и рабочего хода.

Моделирование и определение геометрических параметров точности формы поверхности катания на 52-м переходе при помощи САПР подтвердило достоверность расчетных режимов обработки и получаемых величин погрешности.

Основное технологическое время, необходимое для обработки по указанному маршруту, с учетом обработки до упора и частоты вращения бандажа ~ 1 об/мин составит:

1-й переход:

$$\frac{2 \text{ прохода} \cdot 100 \text{ мм}}{50 \text{ мм/об} \cdot 1 \text{ об/мин}} + \frac{2 \text{ об} \cdot 2 \text{ прохода}}{1 \text{ об/мин (на врезание и выход)}} = 8 \text{ мин}; \quad (13)$$

2-51-й переходы:

$$\frac{5 \text{ проходов} \cdot 100 \text{ мм}}{50 \text{ мм/об} \cdot 1 \text{ об/мин}} + \frac{2 \text{ об} \cdot 50 \text{ проходов}}{1 \text{ об/мин}} = 200 \text{ мин}; \quad (14)$$

52-й переход:

$$\begin{aligned} & \frac{2 \text{ прохода} \cdot 100 \text{ мм}}{50 \text{ мм/об} \cdot 1 \text{ об/мин}} + \frac{1 \text{ проход} \cdot 600 \text{ мм}}{50 \text{ об/мин} \cdot 1 \text{ об/мин}} + \frac{14 \text{ проходов} \cdot 800 \text{ мм}}{50 \text{ об/мин} \cdot 1 \text{ об/мин}} + \\ & + \frac{2 \text{ об} \cdot 15 \text{ проходов}}{1 \text{ об/мин}} = 270 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (15)$$

Общее время обработки составило 478 мин, или 7,97 часа.

Существенным отличием данной технологии является то, что обработка ведется до параметров максимального вписанного кругового цилиндра с учетом нормативных требований, но при необходимости можно обрабатывать и точнее.

Обработка производится до тех пор, пока требуемая точность формы не достигнет нужного значения. По результатам виртуального моделирования процесса механической обработки в САПР NX фактические параметры точности формы соответствуют расчетным. Тем самым корректировка маршрута механической обработки не потребовалась.

Разработка и изготовление контрольно-измерительного устройства

Для реализации приведенного выше алгоритма измерения параметров точности формы разработан экспериментальный образец измерительного устройства [23], схема которого представлена на рис. 13 [23].

На рис. 14 и 15 показана реализованная конструкция экспериментального измерительного устройства контроля формы поверхности на базе датчиков и электронных компонентов отечественного производителя [24].

Экспериментальная установка в сборе (рис. 15) состоит из плиты основания 1, на которой шарнирно установлены одна роликоопора 2 и экспериментальная модель измерительного устройства 3. Модель тела 4 наружной поверхностью опирается на роликоопору и щупы измерительного устройства поверхности. Боковой поверхностью модель тела опирается на регулируемые упоры плиты основания.

После сборки и подключения модели измерительного устройства к компьютеру 5 производится отладка измерительного алгоритма. При данной компоновке обеспечивается необходимое количество степеней свободы модели поверхности с возможностью свободного её вращения. Данная экспериментальная установка позволяет имитировать реальный процесс технологического вращения опоры технологического барабана, установленного на две роликоопоры, с возможностью определения параметров точности формы поверхности катания экспериментальной моделью измерительного устройства. Контроль

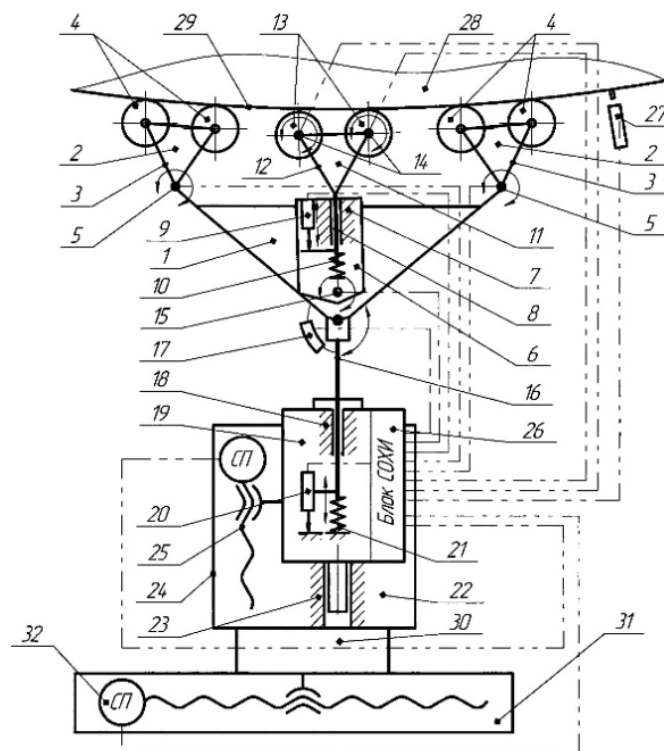


Рис. 13. Устройство для измерения параметров формы изделия:

1 – корпус; 2 – базовые опоры; 3 – основание; 4 – ролик; 5, 14, 15, 17 – датчики угловых перемещений; 6 – качалка; 7, 18, 23 – направляющие; 8 – шток; 9 – датчик линейных перемещений; 10, 21 – пружина сжатия; 11 – измерительная опора, 12 – основание измерительной опоры; 13 – ролик; 16 – штанга; 19 – рама; 20 – датчик линейных перемещений; 22, 24 – механизм поперечного перемещения; 25, 32 – электрический привод; 26 – блок сбора, обработки и хранения информации; 27 – датчик полного оборота; 28 – деталь; 29 – поверхность детали; 30 – крепление; 31 – устройство продольного перемещения; 32 – силовой привод перемещений [23]

Fig. 13. Device for measuring product shape parameters:

1 – case; 2 – basic supports; 3 – base; 4 – roller; 5, 14, 15, 17 – angular displacement sensors; 6 – rocking chair; 7, 18, 23 – guides; 8 – rod; 9 – linear displacement sensor; 10, 21 – compression spring; 11 – measuring support; 12 – base of the measuring support; 13 – roller; 16 – rod; 19 – frame; 20 – linear displacement sensor; 22, 24 – transverse movement mechanism; 25, 32 – electric drive; 26 – block for collecting, processing and storing information; 27 – full turn sensor; 28 – detail; 29 – part surface; 30 – mount; 31 – longitudinal movement device; 32 – power drive displacements [23]

точности настройки и юстировки произведен по эталонной поверхности с известным радиусом кривизны, а также концевыми мерами.

Исходя из принятых принципов и подходов предложенная технология представляет собой следующую последовательность действий.



Рис. 14. Экспериментальный образец измерительного устройства с реализованным блоком контроля

Fig. 14. An experimental sample of the measuring device with the use of a control unit

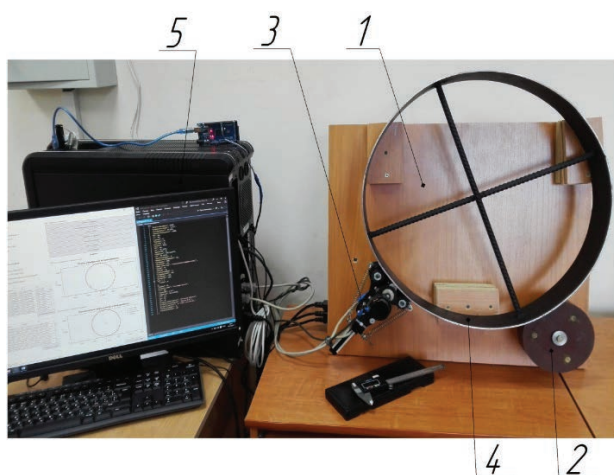


Рис. 15. Измерение на лабораторном образце:
1 – плита основания; 2 – роlikоопора; 3 – измерительное устройство; 4 – модель тела вращения; 5 – компьютер

Fig. 15. Measurement on a laboratory sample:
1 – base plate; 2 – roller support; 3 – measuring device;
4 – model of a body of revolution; 5 – computer

1. Плановое измерение поверхности катания бандажа с целью выявления превышения допустимых величин параметров точности формы:

- 3-мерная цифровая реконструкция поверхности;
- расчет параметров точности формы поверхности;
- запись и сохранение данных, определение необходимости механической обработки.

2. Моделирование процесса формообразования обрабатываемой поверхности для многопроходной механической обработки:

- обработка данных измерения и параметров обрабатываемого модуля;

- расчет, построение и выбор оптимального маршрута механической обработки, а также технологических режимов обработки на каждый технологический переход;

- запись и сохранение данных.

3. Выполнение механической обработки поверхности:

- выполнение многопроходной механической обработки по рассчитанному маршруту механической обработки;

- выполнение контрольных промежуточных измерений с определением параметров точности формы поверхности или её части при необходимости;

- корректировка маршрута обработки по данным контрольных измерений.

4. Итоговое контрольное измерение параметров точности формы поверхности. Корректировка маршрута механической обработки либо окончание выполнения механической обработки.

Выводы

Представленные методы и виртуальное моделирование измерений для восстановительной обработки позволяют существенно сократить время обработки по сравнению с технологией с активным контролем формы, а также с традиционной методикой, при которой припуск снимается с корректировкой после каждого прохода. Отличие состоит в том, что заранее рассчитывается маршрут обработки и измерение с корректировкой производится только по мере необходимости.

Определено, что при обеспечении единой технологической базы на каждый отдельный технологический переход в рамках мобильной технологии механической обработки поверхности катания бандажей технологических барабанов повышается точность и скорость обработки. Кроме того, обеспечивается наследование параметров точности для всей поверхности, что позволяет получить единый профиль продольного сечения всей поверхности. При этом в случае базирования по участку поверхности с минимальной величиной погрешности формы сокращается количество технологических рабочих ходов,

необходимых для достижения требуемой точности формы поверхности.

Обработка всей оставшейся части поверхности, кроме участка под базирование, на каждом технологическом переходе является существенно менее эффективной, чем обработка только участка поверхности под перебазирование до получения на обработанном участке нормативных параметров точности. После этого базирование осуществляется по полученному участку поверхности с обработкой всей оставшейся поверхности. В данном случае (для виртуальной модели) обработка 800 мм между сечениями заняла 15 рабочих ходов, а в случае обработки всей поверхности на каждом переходе заняла бы 52 рабочих хода.

При использовании виртуального моделирования, способа контроля и метода определения припуска могут быть получены технические результаты и решены задачи повышения производительности и обеспечения точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах.

Список литературы

1. Phillips Kiln Services. – URL: <http://www.pkse.co.uk> (accessed: 13.04.2022).
2. Boateng A.A. Rotary kilns: transport phenomena and transport processes. – Elsevier, 2015. – 390 p. – ISBN 9780128038536.
3. Design and mechanical behavior analysis of two-stall cement rotary kiln cylinder / W. Wei, Y. Peng, L. Du, Y. Cai // International Journal of Performability Engineering. – 2020. – Vol. 16, iss. 6. – P. 883–895. – DOI: 10.23940/ijpe.20.06.p7.883895.
4. Anti-fatigue optimization of kiln shell at intermittent multi-body contact state / X. Lei, Y. Xiao, G. Chen, Y. Liu, X. Zhao // Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban) = Journal of Sichuan University. Engineering Science Edition. – 2014. – Vol. 46, iss. 6. – P. 185–190. – In Chinese.
5. Wei G., Tan Q. Measurement of shaft diameters by machine // Applied Optics. – 2011. – Vol. 50, iss. 19. – P. 3246–3253. – DOI: 10.1364/AO.50.003246.
6. Syusyuka E.N., Amineva E.Kh. Control of mobile equipment for the processing of marine shaft lines // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2061. – P. 012083. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012083.
7. Syusyuka E.N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2061. – P. 012022. – DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022.
8. Rotary kiln cylinder deformation measurement and feature extraction based on EMD method / K. Zheng, Y. Zhang, C. Zhao, L. Liu // Engineering Letters. – 2015. – Vol. 23, iss. 4. – P. 283–291.
9. Mogilny S., Sholomitskii A. Precision analysis of geometric parameters for rotating machines during cold alignment // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1709–1715. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.702.
10. Li M., Yu J.P. Status and development of geometric measurement in industry // Chinese Journal of Scientific Instrument. – 2017. – Vol. 38, iss. 12. – P. 2959–2971. – In Chinese.
11. Identification and kinematic calculation of laser tracker errors / J. Conte, J. Santolaria, A.C. Majarena, A. Brau, J.J. Aguilar // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 63. – P. 379–387. – DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.190.
12. Farooqui S.A., Doiron T., Sahay C. Uncertainty analysis of cylindricity measurements using bootstrap method // Measurement. – 2009. – Vol. 42, iss. 4. – P. 524–531. – DOI: 10.1016/j.measurement.2008.09.008.
13. Koziolok S., Derlukiewicz D., Ptak M. Design process innovation of mechanical objects with the use of design for Six Sigma methodology // Solid State Phenomena. – 2010. – Vol. 165. – P. 274–279. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.165.274.
14. A self-calibration rotational stitching method for precision measurement of revolving surfaces / Y. Liu, C.F. Cheung, X. Feng, C.J. Wang, R.K. Leach // Precision Engineering. – 2018. – Vol. 54. – P. 60–69. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.05.002.
15. Ramaswami H., Kanagaraj S., Anand S. An inspection advisor for form error in cylindrical features // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 40. – P. 128–143. – DOI: 10.1007/s00170-007-1321-4.
16. Variable optical null based on a yawing CGH for measuring steep acylindrical surface / J. Peng, D. Chen, H. Guo, J. Zhong, Y. Yu // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, iss. 16. – P. 20306–20318. – DOI: 10.1364/OE.26.020306.
17. Influence of eccentricity and tilt of cylindrical part's axis on the measurement results of its diameters Z. Zhao, B. Li, G. Zhang, H. Yu, M. Shang // Measurement. – 2019. – Vol. 138. – P. 232–239. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.085.
18. Stamboliska Z., Rusinski E., Moczko P. Proactive condition monitoring of low-speed machines. – Cham: Springer International Publishing, 2015. – P. 53–68. – ISBN 978-3-319-10493-5. – ISBN 3319104934.
19. Li X., Shen Y., Wang S. Dynamic modeling and analysis of the large-scale rotary machine with multi-

supporting // Shock and Vibration. – 2011. – Vol. 18. – P. 53–62. – DOI: 10.1155/2011/541049.

20. An online straightness deviation measurement method of rotary kiln cylinder / K. Zheng, Y. Zhang, L. Liu, C. Zhao // Tehnicki Vjesnik. – 2017. – Vol. 24 (5). – P. 1297–1305. – DOI: 10.17559/TV-20150426160032.

21. Žiga A., Karač A., Vukojević D. Analytical and numerical stress analysis of the rotary kiln ring // Tehnicki Vjesnik. – 2013. – Vol. 20. – P. 941–946.

22. Guo Y., Wang Y., Liu X. Real-time optical detection system for monitoring roller condition with automatic error compensation // Optics and Lasers in Engineering. – 2014. – Vol. 53. – P. 69–78. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.007.

23. Патент № 161400 Российская Федерация, МПК G 01 B 5/20 (2006.01). Измерительное устройство для определения формы поверхностей крупногабаритных деталей – тел вращения: № 2015152710/28; заявл. 08.12.2015; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11 / С.П. Тимофеев, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко, М.Н. Воронкова, А.В. Гринек; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова.

24. Способ контроля параметров геометрической точности судовых валопроводов / А.В. Гринек, С.П. Тимофеев, С.И. Кондратьев, А.В. Хуртасенко // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 3, т. 1. – С. 90–97. – DOI: 10.37220/MIT.2020.49.3.011.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Machining technology, digital modelling and shape control device for large parts

Sergey Timofeev^{1, a}, Anna Grinek^{2, b, *}, Andrej Hurtasenko^{3, d}, Igor Boychuk^{2, c}

¹ Limited Liability Company «Promagro», 370a Rzhevskoe shosse, Shebekino, 309290, Russian Federation

² Admiral Ushakov State Maritime University, 93 Lenin's avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation

³ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-6740-5163>, timofeevsp@inbox.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7953-3501>, grinyokann@gmail.com,

^c <https://orcid.org/0000-0002-2614-5457>, hurtintbel@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1996-2184>, boychuk@ieee.org

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 February 2022

Revised: 14 March 2022

Accepted: 23 March 2022

Available online: 15 June 2022

Keywords:

Digital simulation

Large parts

Riding ring

Shape measurement

Mechanical restoration

ABSTRACT

Introduction. The development of a method for controlling the accuracy parameters of large axisymmetric bodies is an urgent task that is being solved by specialists from various industries. Application for adjustment and correction of machining based on the measurement of surface shape parameters directly during machining is shown. **Purpose of work** is to improve mobile processing technologies using special measuring devices and processing module. For this, the problems of development and analysis of mathematical models that describe the process of basing and machining of a riding ring as a cylindrical object with a non-stationary axis of rotation is solved. A study of the methodology is carried out, control schemes are designed, and equipment for processing mobile devices is developed. **The methods of research** are the analysis of the developed mathematical models, taking into account the assignment of effective technological modes. Three-dimensional and simulation modeling of processing, hardware-software implementation of proposed solutions, and statistical processing of measurement results are carried out. **Results and discussion.** The algorithm and methodology are tested with a three-dimensional simulation model. The presented methodology for measuring and calculating the allowance for mechanical restoration can significantly reduce machining time compared to active form control and compared to the traditional method of assigning an allowance for machining. The measurement and adjustment of the allowance based on the measurement data is not carried out after each measurement, but only in the case of transition to finishing transitions or for accuracy control. It is determined that by providing a single technological base for each individual technological transition within the framework of the mobile technology of machining of the rolling surface of the riding rings of technological drums, the accuracy and speed of processing increase. An original design of the device for monitoring parameters is developed; an experimental assembly and a laboratory model of the riding ring are made.

For citation: Timofeev S.P., Grinek A.V., Hurtasenko A.V., Boychuk I.P. Machining technology, digital modelling and shape control device for large parts. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 6–24. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24. (In Russian).

References

1. Phillips Kiln Services. Available at: <http://www.pkse.co.uk> (accessed 13.04.2022).
2. Boateng A.A. *Rotary kilns: transport phenomena and transport processes*. Elsevier, 2015. 390 p. ISBN 9780128038536.
3. Wei W., Peng Y., Du L., Cai Y. Design and mechanical behavior analysis of two-stall cement rotary kiln cylinder. *International Journal of Performability Engineering*, 2020, vol. 16, iss. 6, pp. 883–895. DOI: 10.23940/ijpe.20.06.p7.883895.
4. Lei X., Xiao Y., Chen G., Liu Y., Zhao X Anti-fatigue optimization of kiln shell at intermittent multi-body contact state. *Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban) = Journal of Sichuan University. Engineering Science Edition*, 2014, vol. 46, iss. 6, pp. 185–190. (In Chinese).

* Corresponding author

Grinek Anna V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Admiral Ushakov State Maritime University,
 93 Lenin's avenue,
 353918, Novorossiysk, Russian Federation
Tel.: +7-960-637-38-82, **e-mail:** grinyokann@gmail.com

5. Wei G., Tan Q. Measurement of shaft diameters by machine vision. *Applied Optics*, 2011, vol. 50, iss. 19, pp. 3246–3253. DOI: 10.1364/AO.50.003246.
6. Syusyuka E.N., Amineva E.Kh. Control of mobile equipment for the processing of marine shaft lines. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2061, p. 012083. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012083.
7. Syusyuka E.N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2061, p. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022.
8. Zheng K., Zhang Y., Zhao C., Liu L. Rotary kiln cylinder deformation measurement and feature extraction based on EMD method. *Engineering Letters*, 2015, vol. 23, iss. 4, pp. 283–291.
9. Mogilny S., Sholomitskii A. Precision analysis of geometric parameters for rotating machines during cold alignment. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1709–1715. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.702.
10. Li M., Yu J.P. Status and development of geometric measurement in industry. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, vol. 38, iss. 12, pp. 2959–2971. (In Chinese).
11. Conte J., Santolaria J., Majarena A.C., Brau A., Aguilar J.J. Identification and kinematic calculation of laser tracker errors. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 63, pp. 379–387. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.190.
12. Farooqui S.A., Doiron T., Sahay C. Uncertainty analysis of cylindricity measurements using bootstrap method. *Measurement*, 2009, vol. 42, iss. 4, pp. 524–531. DOI: 10.1016/j.measurement.2008.09.008.
13. Koziółek S., Derlukiewicz D., Ptak M. Design process innovation of mechanical objects with the use of design for Six Sigma methodology. *Solid State Phenomena*, 2010, vol. 165, pp. 274–279. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.165.274.
14. Liu Y., Cheung C.F., Feng X., Wang C.J., Leach R.K. A self-calibration rotational stitching method for precision measurement of revolving surfaces. *Precision Engineering*, 2018, vol. 54, pp. 60–69. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.05.002.
15. Ramaswami H., Kanagaraj S., Anand S. An inspection advisor for form error in cylindrical features. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 40, pp. 128–143. DOI: 10.1007/s00170-007-1321-4.
16. Peng J., Chen D., Guo H., Zhong J., Yu Y. Variable optical null based on a yawing CGH for measuring steep acylindrical surface. *Optics Express*, 2018, vol. 26, iss. 16, pp. 20306–20318. DOI: 10.1364/OE.26.020306.
17. Zhao Z., Li B., Zhang G., Yu H., Shang M. Influence of eccentricity and tilt of cylindrical part's axis on the measurement results of its diameters. *Measurement*, 2019, vol. 138, pp. 232–239. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.085.
18. Stamboliska Z., Rusinski E., Moczko P. *Proactive condition monitoring of low-speed machines*. Cham, Springer International Publishing, 2015, pp. 53–68. ISBN 978-3319104935, ISBN 3319104934.
19. Li X., Shen Y., Wang S. Dynamic modeling and analysis of the large-scale rotary machine with multi-supporting. *Shock and Vibration*, 2011, vol. 18, pp. 53–62. DOI: 10.1155/2011/541049.
20. Zheng K., Zhang Y., Liu L., Zhao C. An online straightness deviation measurement method of rotary kiln cylinder. *Tekhniki Vjesnik*, 2017, vol. 24 (5), pp. 1297–1305. DOI: 10.17559/TV-20150426160032.
21. Žiga A., Karač A., Vukojević D. Analytical and numerical stress analysis of the rotary kiln ring. *Tekhniki Vjesnik*, 2013, vol. 20, pp. 941–946.
22. Guo Y., Wang Y., Liu X. Real-time optical detection system for monitoring roller condition with automatic error compensation. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, vol. 53, pp. 69–78. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.007.
23. Timofeev S.P., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V., Voronkova M.N., Grinek A.V. *Izmeritel'noe ustroystvo dlya opredeleniya formy poverkhnosti krupnogabaritnykh detalei – tel vrashcheniya* [The measuring device for determining the surface shape of large size parts of rotation type]. Patent RF, no. 161400, 2016.
24. Grinek A.V., Timofeev S.P., Kondrat'ev S.I., Hurtasenko A.V. Sposob kontrolya parametrov geometricheskoj tochnosti sudovykh valoprovodov [Method of controlling geometric accuracy for ship shafts]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, 2020, no. 3, pt. 1, pp. 90–97. DOI: 10.37220/MIT.2020.49.3.011.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).