

УДК (621.9)

doi:10.18720/SPBPU/2/id-146

С.П. Тимофеев¹, А.В. Гринек²

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ОСЬЮ



¹ Сергей Петрович Тимофеев,
АО «Инжиниринговый центр «Кронштадт»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: timofeevsp@inbox.ru



² Анна Владимировна Гринек,
ООО «Сигматек»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: grinyokann@gmail.com

Аннотация

В работе представлены результаты исследования технологии механической обработки поверхности катания крупногабаритных опор технологических барабанов на основе предложенного программно-аппаратного комплекса. Показана методика цифровой реконструкции формы замкнутой криволинейной поверхности, использующая пошаговое измерение, алгоритмы аппроксимации и расчета погрешности формы. Представлены оптимальные алгоритмы построения технологического процесса механической обработки и расчета соответствующих режимов резания с применением предложенной конструкции обрабатываемого модуля. Результаты экспериментальных и теоретических исследований позволяют повысить эффективность механической обработки за счет сокращения основного технологического времени.

Ключевые слова: механическая обработка, реконструкция, цифровой, нестационарная ось, измерение, припуск, измерительная система

Введение

Объект исследования – технологический процесс механической обработки поверхности катания крупногабаритных опор технологических барабанов непосредственно в процессе их эксплуатации. Особенности механической обработки являются: крупный размер изделия, использование мобильного станочного оборудования, нестационарное положение оси вращения изделия в процессе обработки и необходимость контроля формы и коррекции величины снимаемого припуска в процессе механической обработки, а также сложность обеспечения постоянства технологической базы при обработке [1-3].

Для решения задач описания формы цилиндрических тел применяются следующие основные подходы к описанию:

1. Представление формы поверхности в виде гармонического ряда Фурье. Производные функции дают почти исчерпывающее представление о форме поверхности с точки зрения статики, кинематики и динамики механизма [4].

2. Анализ временных рядов (вейвлет-анализ, анализ сингулярного спектра, фрактальный анализ) [5].

3. Аппроксимация минимальных и максимальных описывающих окружностей [6,8].

Кроме использования данных об измерении геометрических параметров детали могут применяться лазерные [9,10] и оптические системы [11,12]. В свою очередь, реконструированная форма поверхности является частью измерительной системы активного контроля и наладки мобильного оборудования для восстановления формы [13,14]. Процесс обработки при монтаже или восстановлении подобных изделий может быть построен с применением различных машиностроительных технологий: абразивной или лезвийной обработки, наплавления. Используемое при этом оборудование требует разработки схем наладки, управления режимами обработки и наличия оригинального станочного оборудования.

Методы

Представленная технология механической обработки крупногабаритных тел вращения использует оригинальный метод измерения и цифровой реконструкции формы обрабатываемой поверхности. Также разработана конструкция мобильного станочного модуля и программно-аппаратный комплекс, реализованный в измерительной системе. Это позволяет получить пооперационный маршрут механической обработки с возможностью его анализа и корректировки для повышения производительности. Кроме того, корректировка

технологического процесса может автоматически выполняться на основе текущих измерений обрабатываемой поверхности.

Результаты

Ниже представлены основные моменты функционирования разработанной технологии и информационной-измерительной системы:

- принципиальная схема измерения;
- цифровая реконструкция контуров сечений и всей поверхности;
- методика расчета величины погрешности формы;
- организационная диаграмма программного обеспечения информационно-измерительной системы.

Принципиальная схема измерения. Необходимость механической обработки обусловлена наличием погрешности формы, превышающей допустимое значение соответствующим стандартом. Например, для опоры технологического барабана цементной печи одним из основных параметров является биение поверхности катания. Но при этом фактическая ось вращения агрегата не имеет стационарного положения и в общем случае не совпадает с теоретической, ввиду чего определить биение данной поверхности, согласно ГОСТ, является крайне сложной задачей. Поэтому принято решение о переходе от погрешности формы в виде биения к отклонению от круглости/цилиндричности. Данное решение обеспечивает возможность фактического измерения параметра формы, и при выявлении фактического положения оси вращения, возможность пересчета в биение. Для расчета отклонения от круглости отдельного сечения поверхности определяются параметры окружности максимального радиуса, вписанной в реконструированную цифровую версию контура данного сечения [15]. А для расчета отклонения от цилиндричности всей или части поверхности выполняется определение параметров окружности максимального радиуса, вписанной в спроецированные на единую плоскость реконструированные цифровые версии контуров сечений поверхности. При этом реконструированные цифровые версии контуров сечений представлены массивом координат точек. На рис. 1а показана принципиальная конструктивная схема измерительного устройства, позволяющего получить указанный массив данных.

Алгоритм получения массива координат точек пояснен на рис. 1б. Согласно приведенной на рисунке схемы устройство должно иметь три измерительных щупа ($r1$, $r2$, $r3$), которые в свою очередь крепятся на корпусе в точках $m.A$; $m.B$ и $m.C$. Для обеспечения возможности контакта с поверхностью различной кривизны все щупы имеют возможность изменения угла расположения, за счет установки их шарнирно, и дополнительно щуп $r2$ имеет возможность изменять свою длину.

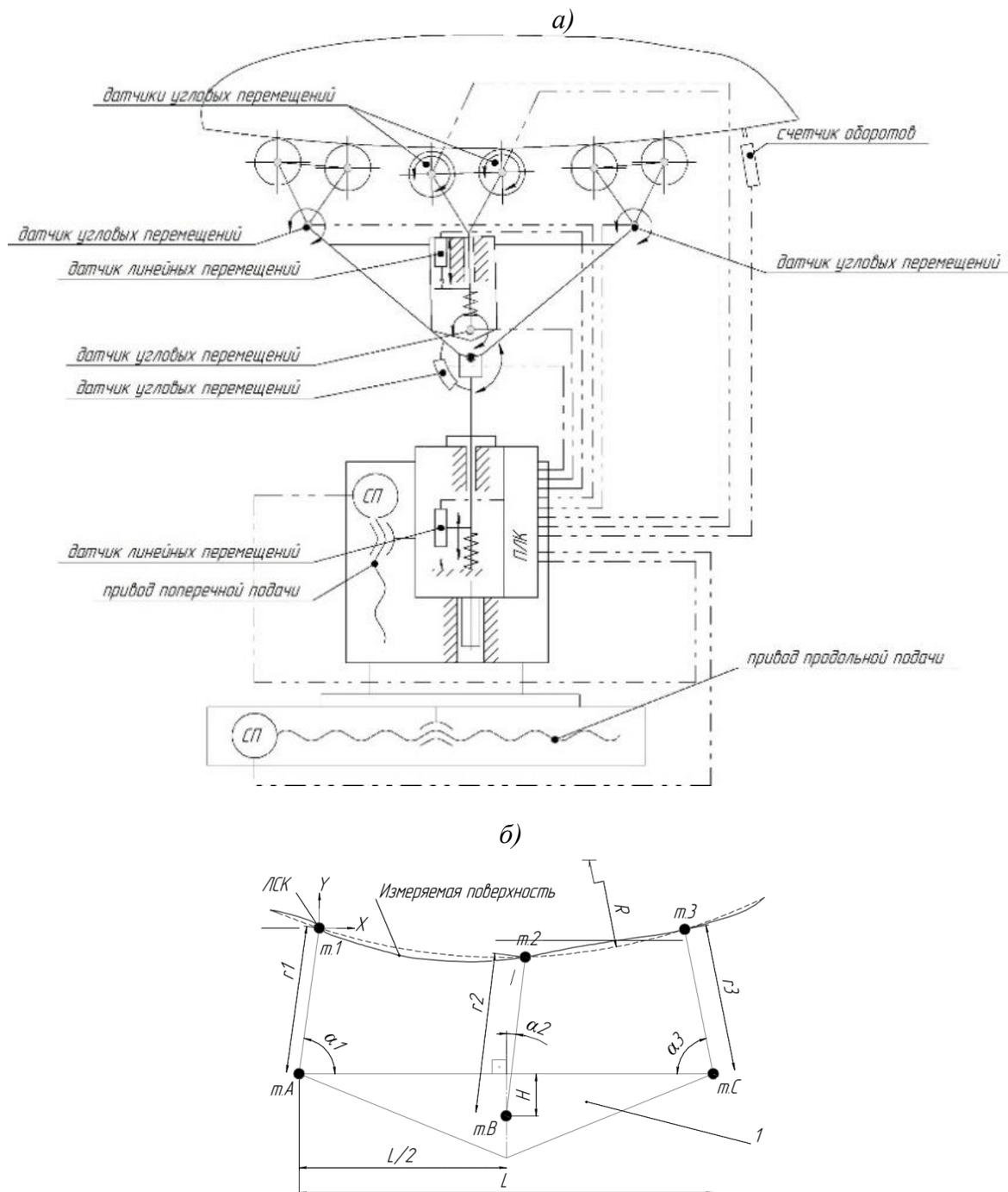


Рис. 1. *а* – принципиальная конструктивная схема измерительного устройства (СП – сервопривод, ПЛК – программируемый логический контроллер); *б* – принципиальная схема измерения (ЛСК – локальная система координат)

Фиксированными углами поворота измерительных щупов $r1$ и $r3$ относительно плеча L соответственно являются углы $\alpha1$ и $\alpha3$. Точкой начала системы координат каждой итерации измерения принята $m.1$, с параллельной плечу L осью OX . Таким образом постоянными величинами являются: $r1$, $\alpha1$, $r3$, $\alpha3$, L , B и H , а переменными: $r2$, $\alpha2$.

Каждая новая итерация измерения производится в момент перехода измерительного устройства в расчетное положение следующим образом (рис. 2):

- в момент старта производится определение координат трех контактных точек $m.1$, $m.2$, $m.3$ в ЛСК первого измерения;
- далее устройство переводится в новое положение таким образом, чтобы точка $m.2'$ новой итерации измерения совпала с точкой $m.3$ предыдущей. Перемещение по поверхности на длину L_d ;
- выполняется следующее определение координат точек $m.1'$, $m.2'$, $m.3'$ в ЛСК второго измерения;
- и т.д.

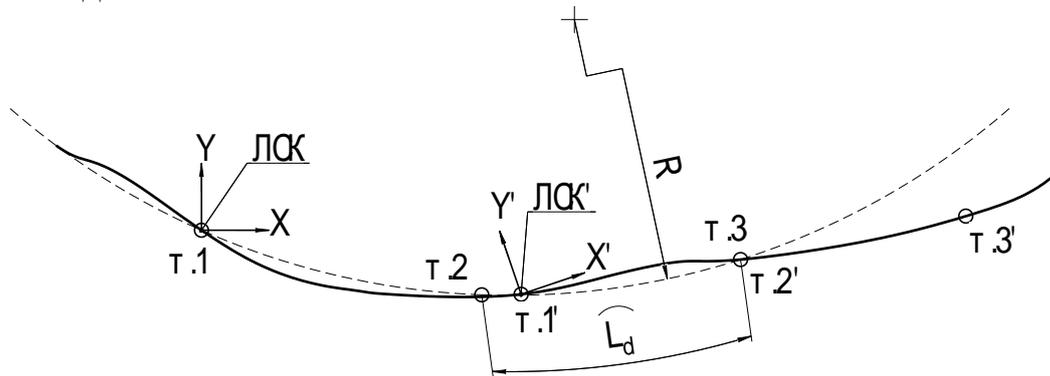


Рис. 2. Схема измерения и аппроксимации контура обрабатываемой поверхности

Методика расчета величины погрешности поверхности. Измерение и цифровая реконструкция поверхности состоит из двух основных этапов: определения координат точек аппроксимирующих дуг в текущем сечении и восстановления геометрической формы контуров во всех сечениях. Далее на основе уже восстановленных контуров сечений выполняется расчет их погрешности формы. Тем самым на данном этапе основной задачей является определение параметров вписанной окружности. Для этого выполняется поиск центра и радиуса наибольшей пустой окружности. При этом задача имеет ограниченное решение так как центр окружности лежит внутри контура сечения. Для его нахождения возможно использовать следующий критерий:

$$\max_{x, y} \min_{i=1..n} [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]$$

В рамках нелинейного программирования данный критерий может быть сведен к следующей задаче:

$$\begin{cases} z \rightarrow \max \\ (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 > z, i = 1..n. \end{cases}$$

Приведенную задачу предложено решить методами вычислительной геометрии, а именно с помощью диаграммы Вороного (рис. 3, а). Для

определения вписанной в полученный контур окружности максимального радиуса необходимо построить диаграмму Вороного и определить максимальный радиус окружности Делоне, которая и является искомой окружностью [6]. Таким образом, зная параметры вписанной окружности возможно рассчитать и отклонение от круглости. Расчетная схема для определения максимальной погрешности формы в поперечном сечении бандажа представлена на рис. 3, б.

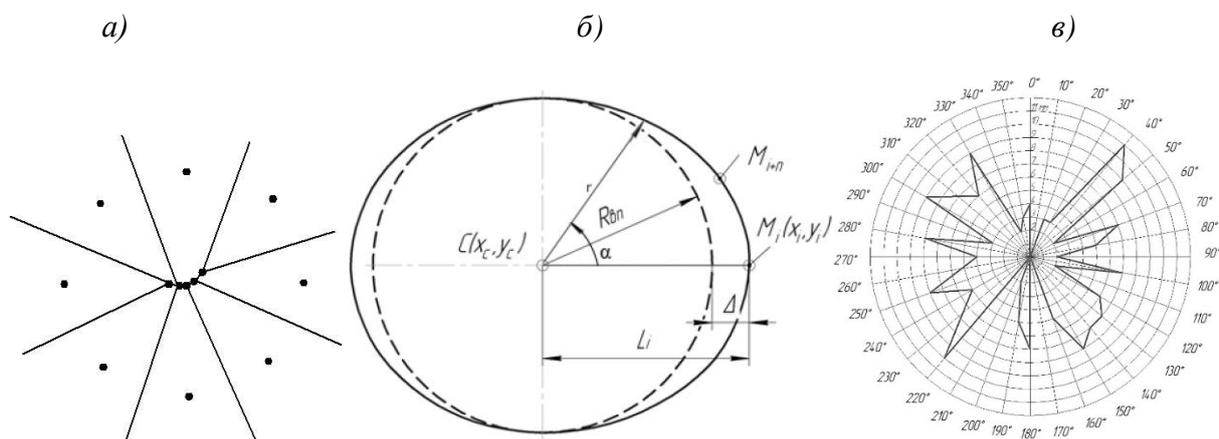


Рис. 3. а – диаграмма Вороного для точек, расположенных по контуру близкому к окружности; б – схема для определения отклонения от круглости; в – круглограмма отклонений

Расчет величин погрешности формы производится в два этапа:

Шаг 1. Рассчитывается расстояние L_i от центра вписанной окружности до всех точек M_i контура реконструированного после измерения сечения;

Шаг 2. Далее определяется величина отклонения Δ_i формы, как разность величин L_i и величины радиуса окружности. Соответственно максимальное значение Δ_i и будет являться искомой величиной отклонения от круглости.

На основе проведенных расчетов возможно построение круглограммы с величинами отклонений (рис. 3, в).

Цифровая симуляция процесса измерения. Современные технологические системы показывают эффективность применения цифровых двойников при проектировании технологических процессов [16-18]. В данной работе использована виртуальная CAD-модель механической обработки изношенной поверхности катания бандажа цементной печи с помощью переносного обрабатывающего модуля. При этом расчет и построение технологического процесса механической обработки выполнен на основе данных, полученных при моделировании процесса измерения и расчета погрешности формы с применением виртуальной модели измерительного устройства. Непосредственный расчет технологических режимов выполнен в программном модуле, учитывающем конструктивные

параметры станочного модуля и точность формы, реконструированной на основе измерения обрабатываемой поверхности.

Применение имитационного моделирования для анализа технических решений позволило значительно сократить временные и финансовые затраты, так как разработка и изготовление предложенных средств оснащения и программного обеспечения, указанных ранее в опытных экземплярах, требует существенных затрат. Тем самым на данном этапе подтвердилась правильность решений и выявлены направления для дальнейшей доработки и оптимизации станка и измерительного устройства.

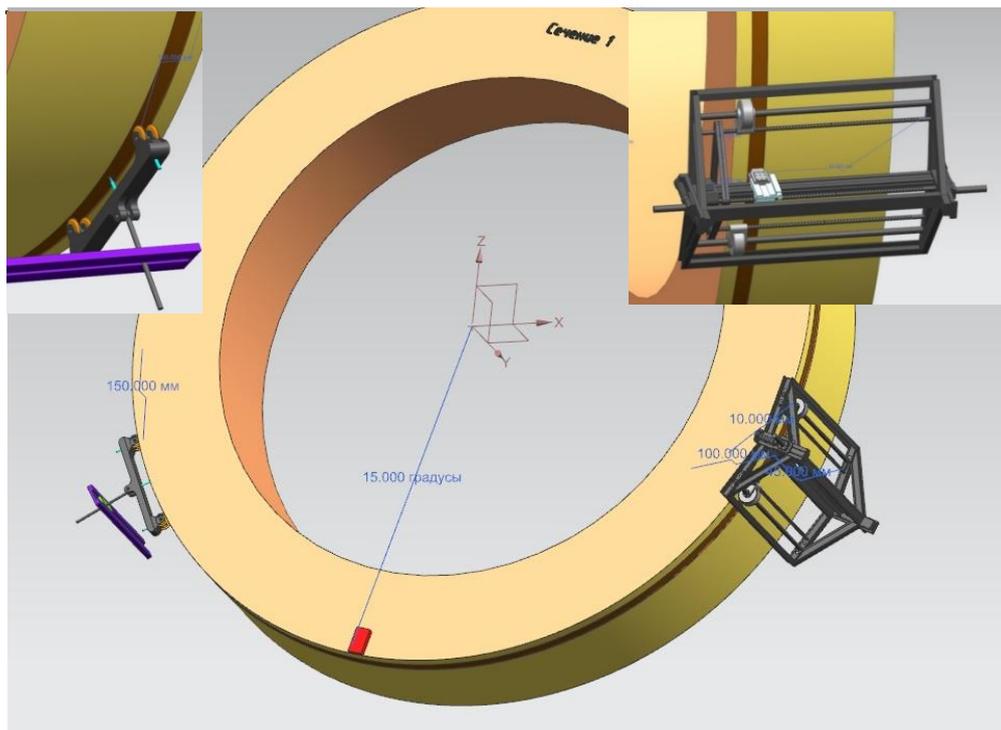


Рис. 4. Цифровая симуляция процесса измерения и реконструкции

Основные этапы моделирования были выполнены в САПР Siemens NX. С целью обеспечения возможности сравнительного анализа эффективности предложенных решений с уже применяемыми для виртуальной модели бандажа были взяты параметры геометрической формы поверхности катания изношенных бандажей эксплуатируемых печных агрегатов. Погрешность формы принятой модели бандажа соответствует предельно допустимому износу бандажа в отрасли. Для номинального диаметра 6,1 м и ширины 1 м, полное радиальное биение составляет 12 мм и характеризуется бочкообразным профилем продольного сечения.

В результате моделирования доказано существенное сокращение основного технологического времени обработки относительно существующих технологий до 2,37 раза. Данные виртуального эксперимента позволили визуализировать систему и отладить программное

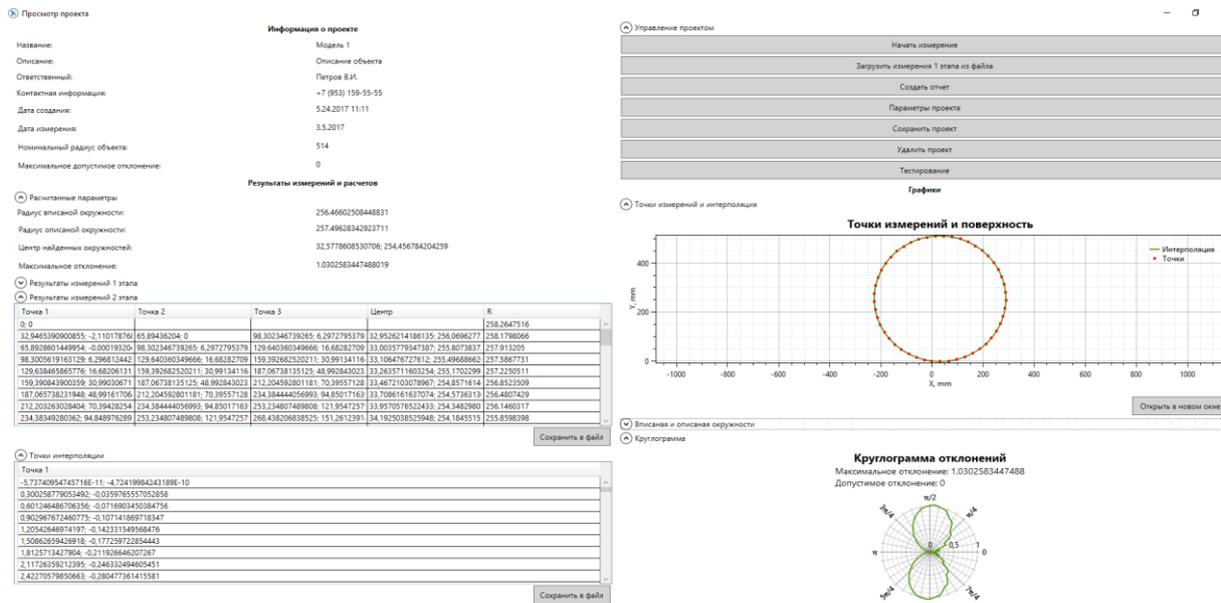
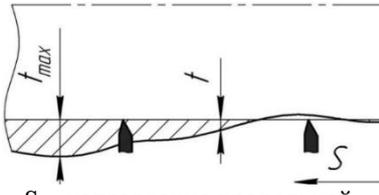
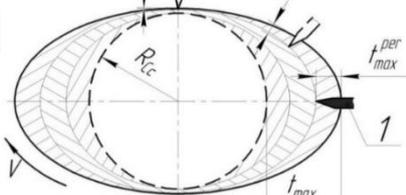
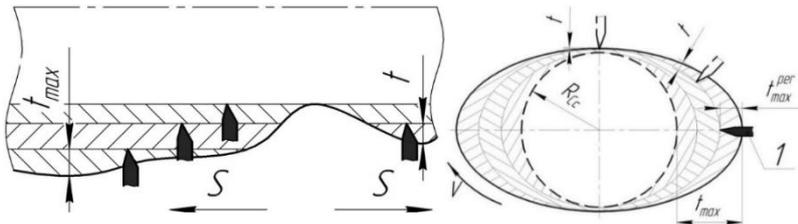
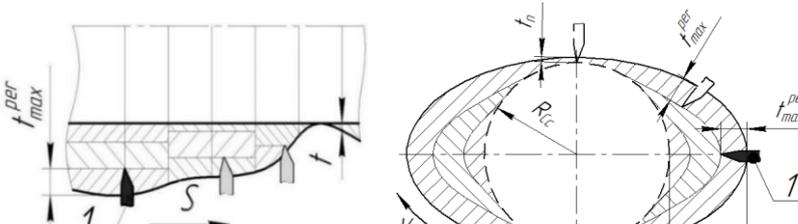
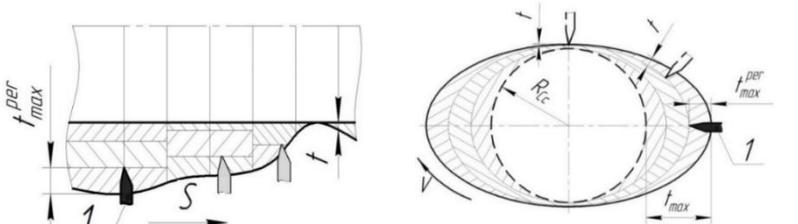


Рис. 6. Интерфейс пользователя измерительной системы

Схемы назначения глубины резания механической обработки в продольном сечении. Ниже в таблице 1 приведены основные варианты возможных вариантов формирования глубины резания в продольном сечении при проектировании технологического процесса. Схемы предполагают применение станочного модуля с возможностью обеспечения постоянства технологической базы при обработке, например, предложенного в [19] и наличия реконструированной цифровой модели обрабатываемой поверхности.

Таблица 1. Варианты схем обработки

1	<p>Постоянная настройка вылета режущего инструмента на переход - выполнение обработки всей поверхности, кроме участка под технологическую базу в рамках каждого установка за один рабочий ход.</p>	 <p>S – направление продольной подачи</p>	 <p>Преимущества</p> <ul style="list-style-type: none"> –не требуется частые вспомогательные переходы со сменой базирования; –единый профиль продольного сечения (за исключением части поверхности используемой как база) после первого перехода. <p>Недостатки</p> <ul style="list-style-type: none"> –переменная нагрузка на инструмент; –возможно превышение технологически максимально допустимой глубины обработки $t_{max}^{рег}$ и/или отсутствие обработки части поверхности на данном переходе; –требуется относительно много
---	--	--	--

			дополнительных рабочих ходов для достижения требуемой точности формы.
2	<p>Постоянная настройка вылета режущего инструмента на рабочий ход - выполнение обработки всей поверхности, кроме участка под технологическую базу, в рамках каждого установа за несколько рабочих ходов.</p>	 <p>S – направление продольной подачи 1 – режущий инструмент</p>	<p><i>Преимущества</i></p> <ul style="list-style-type: none"> –не требуется частые вспомогательные переходы со сменой базирования; –возможность настройки глубины резания без превышения технологически максимально допустимой глубины обработки t_{max}^{per}. <p><i>Недостатки</i></p> <ul style="list-style-type: none"> –переменная нагрузка на инструмент; –требуется привод управления вылетом инструмента –возможно изменение глубин обработки в продольном сечении обрабатываемой поверхности от 0 до её максимального значения –требуется относительно много дополнительных рабочих ходов для достижения требуемой точности формы.
3	<p>Переменная настройка вылета режущего инструмента на переход - выполнение обработки всей поверхности, кроме участка под технологическую базу, с разбиением на участки с различной и подстраиваемой глубиной резания в рамках первого установа. На втором установе дообработка участка поверхности бывшего технологической базой на предыдущем установе.</p>	 <p>S – направление продольной подачи 1 – режущий инструмент</p>	<p><i>Преимущества</i></p> <ul style="list-style-type: none"> –минимизация снимаемого припуска; –возможна избирательная обработка с максимальной глубиной обработки до параметров вписанного цилиндра; –минимальное количество рабочих ходов; –возможна обработка поверхности за два технологических перехода. <p><i>Недостатки</i></p> <ul style="list-style-type: none"> –требуется привод управления вылетом инструмента и система контроля за текущим значением погрешности; –требуется дополнительные средства для отслеживания взаимного положения поверхности и обрабатываемого модуля.
4	<p>Переменная настройка вылета режущего инструмента на рабочий ход - выполнение обработки поверхности, кроме участка под технологическую базу, с разбиением на участки с</p>		

различной но постоянной глубиной резания на каждый рабочий ход в рамках каждого установа. Возможно отсутствие обработки части поверхности при каждом установе.	1 – режущий инструмент; S – направление продольной подачи обработки; V – направление вращения заготовки)	
	<p><i>Преимущества</i></p> <p>–возможна избирательная обработка</p> <p>– возможна обработка до параметров расчетного вписанного кругового цилиндра, с минимизацией снимаемого припуска;</p> <p>–не требуется дополнительные средства для отслеживания взаимного положения поверхности и обрабатываемого модуля.</p>	<p><i>Недостатки</i></p> <p>–требуется несколько рабочих ходов и перебазирований обрабатываемого модуля;</p> <p>–требуется привод управления вылетом инструмента и система контроля за текущим значением погрешности;</p> <p>–переменная расчетная глубина резания от нуля до максимально допустимой.</p>

Каждый из указанных в таблице вариантов удаления припуска позволяет последовательно уменьшать погрешность формы поверхности в продольном и поперечном направлении, что достигается предложенной схемой обрабатываемого модуля и способом его базирования.

В зависимости от выбранной последовательности удаления припуска отличается методика расчета вылета режущего инструмента, но общие принципы и алгоритмы схожи. При этом наибольшей эффективностью обладает 3-й вариант (переменная настройка вылета режущего инструмента на переход), обеспечивающий высокоточную обработку поверхности за наименьшее время. Однако, для обеспечения максимального припуска, требуется специальное высокоточное устройство определения положения поверхности относительно станочного модуля. Подобные дополнительные устройства существенно удорожают технологию, так как требуется разработка соответствующей системы управления приводами оборудования и синтез алгоритмов управления для неё.

Поэтому в качестве базовой для предложенной технологии механической обработки эффективной представляется 4-я схема удаления припуска. Она в полной мере удовлетворяет требованиям и возможности разработки необходимых средств измерений и диагностики.

Обсуждение

Результаты данного исследования: разработанные модели, алгоритмы и технологическое оснащение позволяют реализовать возможность расчета оптимального технологического процесса и режимов резания с возможностью их корректировки в процессе обработки на основе контрольных измерений.

Также в проектирование технологического процесс включена цифровая модель объекта и технологического оснащения.

Заключение

Своевременная оценка искажения формы или износа поверхности опор технологических барабанов и технология мобильной обработки наружной поверхности бандажей являются одним из главных условий обеспечения нормального режима работы оборудования и повышения срока его эксплуатации.

Предложена методика формирования технологического процесса механической обработки контактной поверхности бандажа. Разработаны программно-аппаратные средства контроля и расчета технологических режимов, позволяющие сократить основное технологическое время и минимизировать припуск.

Одновременно с механической обработкой происходит цифровая реконструкция формы поверхности обрабатываемой детали, что позволяет контролировать изменение погрешности формы непосредственно на работающем агрегате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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. – EDN XKSCCN.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Ф. Препарата и М. Шеймос, *Вычислительная геометрия: введение*, Москва: Мир, 1989, p. 478.
- [7] Скворцов А.В., Костюк Ю.Л. *Применение триангуляции для решения задач вычислительной геометрии*. Изд-во Томск: ТГУ, 2002. 128 с.
- [8] 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.
- [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] 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.
- [11] Пат. 2181190 РФ, МПК G01B 21/10. Оптическое устройство для измерения диаметров крупногабаритных деталей / А. Н. Шилин, С. А. Бедкин, Е. Г. Зенина. Заявл. 09.06.2000; опубл. 10.04.2002.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Пат. № 161400, Российская Федерация, МПК G01B 5/20 (2006.01). Измерительное устройство для определения формы поверхностей крупногабаритных деталей – тел вращения / С.П. Тимофеев, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко, М.Н. Воронкова, А.В. Гринек; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2015152710/28, заявл. 08.12.2015; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11.
- [16] Акинцева А.В., Переверзев П.П. Моделирование изменения глубины резания в разных сечениях обрабатываемой поверхности в цифровом двойнике операции круглого врезного шлифования с ЧПУ // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2022. Т. 20. №1. С. 95–104. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-95-104>.
- [17] Yuhan Niu et al 2024 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2815 012022.
- [18] H. S. Amraoui et al 2024 *Eng. Res. Express* 6 025419.
- [19] Пат. № 191596 Российская Федерация, МПК B23B 5/00 (2006.01). Станок для обработки поверхностей крупногабаритных деталей-тел вращения / С.П. Тимофеев, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко, М.Н. Воронкова; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2019114537, заявл. 13.05.2019; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23.

TECHNOLOGICAL AND HARDWARE-SOFTWARE SUPPORT OF MECHANICAL PROCESSING OF LARGE-SIZED BODIES OF ROTATION WITH NON-STATIONARY AXIS

¹Stock company "Engineering Center "Kronstadt", Russia;

²Sigmatek LLC, Russia

Abstract

The paper presents the results of research into the technology of machining of large-size supports of technological drums using the proposed hardware-software complex. A method of digitally reconstructing the shape of a closed curvilinear surface using step-by-step measurement and approximation algorithms is presented. At the same time, the shape error is calculated. The design of a machining module is proposed. Optimal algorithms for constructing the machining process and calculating the corresponding cutting modes are presented. The results of experimental and theoretical studies make it possible to increase the efficiency of machining by reducing the main technological time.

Key words: machining, reconstruction, digital, unsteady axis, measurement, allowance, measuring system

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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. (rus.).
- [4] An online straightness deviation measurement method of rotary kiln cylinder / K. Zheng, Y. Zhang, L. Liu, C. Zhao // *TehnickiVjesnik*. – 2017. –Vol. 24 (5). – P. 1297–1305. – DOI: 10.17559/TV-20150426160032.
- [5] 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.
- [6] P. Preparata, M. Shamos. *Computational Geometry: Introduction*, Moscow: Mir, 1989, p. 478. (rus.)

- [7] Skvortsov A.V., Kostyuk Yu.L. Application of triangulation to solve computational geometry problems. Tomsk Publishing House: TSU, 2002. 128 p.
- [8] 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.
- [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] 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.
- [11] Patent RU 2181190, G01B 21/10, Opticheskoye ustroystvo dlya izmereniya diametrov krupnogabaritnykh detaley (Optical Device to Measure Diameters of Large-Sized Parts), A.N. Shilin, S.A. Bedkin, E.G. Zenina, Priority 2000.06.09, Published 2002.04.10. (rus.)
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Timofeev S.P., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V., Voronkova M.N., Grinek A.V. The measuring device for determining the surface shape of large size parts of rotation type. Patent RF, no. 161400, 2016. (rus.).
- [16] Akinceva A.V., Pereverzev P.P. Modeling the change in cutting force in different sections of the machined surface in a digital twin of a CNC cylindrical plunge grinding operation. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2022. №1. p.p. 95–104. (rus.).
- [17] Yuhan Niu et al 2024 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2815 012022.
- [18] H. S. Amraoui et al 2024 *Eng. Res. Express* 6 025419.
- [19] Timofeev S.P., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V., Voronkova M.N. A machine for surface treatment of large-sized parts-bodies of rotation. Patent RF, no. 191596, 2019. (rus.).