

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.92

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106



ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕЖЕСТКОГО ВАЛА С ЭЛЛИПСНЫМ ПРОФИЛЕМ ПРИ КРУГЛОМ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутина А.С.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Прогнозирование точности обработки на стадии проектирования операции шлифования с ЧПУ в цифровой среде является актуальной задачей в силу отсутствия у различных производителей САПР инструмента, позволяющего контролировать управляющие программы на возможность обеспечения заданной точности обработки при изготовлении партии деталей. Для решения данной задачи предложено использовать цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности, который позволяет прогнозировать погрешности обработки по расчетным значениям радиусов в конце цикла круглого врезного шлифования с учетом влияния переменных технологических факторов. В данной статье представлена модель формообразования радиусов шлифуемой поверхности, позволяющая вести расчет переменной глубины резания на всех участках обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки в зависимости от податливости каждого участка вала по всей длине шлифования с учетом колебания припуска и затупления шлифовального круга. Внедрение цифрового двойника позволит решить задачу прогнозирования точности обработки на стадии проектирования операции шлифования с ЧПУ. Представленные в статье модели получены на основе имитационного моделирования с использованием аналитических методов математического моделирования, базирующихся на фундаментальных физических законах и основных положениях механики резания и теории пластической деформации металла в зоне стружкообразования. Научная новизна приведенных в данной статье исследований заключается в разработке цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем, который впервые учитывает взаимосвязь и влияние на точность обработки глубины резания, режимов резания, физико-механических свойств обрабатываемого металла, силы резания, упругих деформаций технологической системы, кинематики процесса круглого врезного шлифования, геометрии зоны резания, колебания припуска, затупления круга, переменной жесткости вала по длине обработки. В результате в статье представлена часть разработанного впервые методологического и математического обеспечения для цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности. Применение цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности в производстве имеет большую практическую значимость, так как позволяет вести автоматизированный контроль управляющих программ для станков с ЧПУ на возможность обеспечения достижимой точности обработки при изготовлении партии деталей.

Ключевые слова: круглое врезное шлифование, цифровой двойник, погрешность обработки, формообразование обрабатываемой поверхности, переменные условия обработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).

© Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутина А.С., 2021

Для цитирования

Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутина А.С. Цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем при круглом врезном шлифовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 98–106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DIGITAL TWIN OF A SHAPING PROCESS FOR A SURFACE OF A NON-RIGID SHAFT WITH AN ELLIPTICAL PROFILE PROCESSED BY PLUNGE GRINDING

Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Degtyareva-Kashutina A.S.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Predicting the processing accuracy at the design stage of a CNC grinding operation in digital environment is a currently important task due to the lack of a tool for various CAD manufacturers to monitor control programs for ensuring the specified processing accuracy when manufacturing a batch of parts. To cope with this task, it is proposed to use a digital twin of the shaping process of the machined surface, which makes it possible to predict machining errors by the calculated values of the radii at the end of the cylindrical plunge grinding cycle, taking into account the influence of variable technological factors. This paper presents a model for shaping the radii of the ground surface to calculate the variable depth of cut in all sections of the machined surface at each turn of the workpiece, depending on the compliance of each section of the shaft along the entire length of grinding, taking into account the fluctuations of the allowance and bluntness of the grinding wheel. The introduction of a digital twin contributes to dealing with the task of predicting the processing accuracy at the design stage of a CNC grinding operation. The models presented in the paper are developed by a simulation modeling using analytical methods of mathematical modeling based on fundamental physical laws and basic provisions of cutting mechanics and the theory of plastic deformation of metal in the chip formation zone. Scientific novelty of the studies presented in this paper lies in the development of a digital twin of the shaping process for a machined surface of a non-rigid shaft with an elliptical profile, factoring into the relationship, and influence on the accuracy of machining the depth of cut, cutting conditions, physical and mechanical properties of the metal being processed, cutting force, elastic deformations of the technological system, kinematics of the cylindrical plunge grinding process, geometry of the cutting zone, fluctuations of the allowance, bluntness of the wheel, and variable rigidity of the processed shaft along its length. As a result, the paper presents a part of the novel methodological and mathematical support for the digital twin of the shaping of the processed surface. The industrial use of the digital twin of the shaping of the processed surface is of great practical importance, because it contributes to the automated monitoring of control programs for CNC machines to ensure the achievable processing accuracy, when manufacturing a batch of parts.

Keywords: cylindrical plunge grinding, digital twin, machining error, shaping process of the machined surface, variable machining conditions.

The performed research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FENU-2020-0020).

For citation

Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Degtyareva-Kashutina A.S. Digital twin of a shaping process for a surface of a non-rigid shaft with an elliptical profile processed by plunge grinding. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 98–106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106>

Введение

Все более широкое использование на машиностроительных предприятиях различного профиля станков с ЧПУ поставило перед технологами сложную задачу подготовки множества управляющих программ (УП) в цифровой среде различных САМ-систем. На данный момент в САМ-системах отсутствует возможность контроля проектируемых УП на обеспечение точности и качества обработки. В результате возникает необходимость адаптации УП к реальным производственным условиям через ручной под-

бор режимных параметров методом обработки ряда пробных заготовок. Это накладывает дополнительные временные и материальные затраты на себестоимость выпускаемой продукции.

Прогнозирование точности для лезвийной обработки рассматривалась во множестве работ [1–6], лидирующим направлением которых является учет влияния прогиба инструмента и геометрического отклонения конструкции станка через консольную балочную модель режущего инструмента и метод конечных элементов режущего инструмента и заготовки. Общим недостатком указанных выше работ является отсутствие возмож-

ности прогнозирования и оценки точности обработки заготовки, так как отсутствует комплексное моделирование результата формообразования на протяжении всего процесса обработки.

Шлифование является окончательной операцией при изготовлении точных деталей (квалитет 6–7 и шероховатость по Ra 0,05–1,6), определяющей окончательные размеры обрабатываемой поверхности и выполнение требований чертежа по точности и качеству. Примерно половину от общего объема шлифовальных операций составляет круглое шлифование, к которому задаются не только допуски на диаметральные размеры, но допуски формы и расположения поверхностей. Прогнозирование последних является сложной задачей, так как требует расчета изменения размеров с учетом переменной податливости по всей длине обрабатываемой поверхности.

В области шлифования большинство работ, посвященных прогнозированию точности обработки, рассматривают вопросы моделирования получаемого микрорельефа и волнистости обрабатываемой поверхности (шероховатости) [7–9]. Незначительная доля работ посвящена моделированию и прогнозированию точности шлифования [10, 11], общим недостатком является то, что рассматривалась обработка «идеальных поверхностей» (абсолютно круглые или плоские поверхности) без учета упругих деформаций технологической системы (ТС). В результате проведенного анализа можно сказать, что прогнозирование точности обработки на операциях механической обработки (в том числе и шлифовании) является сложной и до сих пор полностью не решенной научной задачей.

Переменная податливость ТС по длине обрабатываемой поверхности является решающим фактором, напрямую воздействующим на точность обработки. Из-за действия радиальной составляющей силы резания происходит неравномерный прогиб участков вала относительно шлифовального круга. Это и определяет различную глубину резания, разные значения обрабатываемой поверхности, погрешность размеров, формы и расположения всей обработанной поверхности вала. Учитывая ступенчатое изменение программной подачи и нелинейное изменение фактической подачи и силы резания по длине обрабатываемой поверхности из-за переменной податливости ТС, можно предположить, что глубина резания будет изменяться по длине обработки на каждом обороте заготовки. Поэтому для прогнозирования точности обработки на

основании расчетных значений размеров шлифованной поверхности предложена модель одновременного расчета переменной глубины резания на всех участках обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки, в зависимости от податливости каждого участка вала по всей длине шлифования. Совокупность переменных глубин резания по всей длине шлифования образует слой снимаемого металла в каждый момент времени. Модель расчета послойного съема металла представляет собой «цифровой двойник» процесса круглого шлифования, который симулирует процесс съема слоя металла переменной толщины (толщина слоя равна глубине резания) одновременно по длине шлифуемой поверхности на каждом обороте заготовки с учетом переменной податливости ТС и переменной глубины резания по длине обрабатываемой поверхности при заданных условиях шлифования.

Цифровой двойник позволяет проводить расчет текущих значений параметров формообразования поверхности, описывающих текущие значения размеров шлифуемой поверхности в течение всего цикла шлифования, и прогнозировать размеры обработанной поверхности вала в конце цикла шлифования путем суммирования толщин слоев съема металла. Цикл шлифования представляет собой ступенчатое изменение режимов резания в зависимости от оставшейся части припуска. Применение цикла позволяет использовать весь диапазон режимов резания и сочетать при обработке заготовки различные стадии (черновую, получистовую и чистовую) [12]. Результатом применения цифрового двойника процесса круглого шлифования являются расчетные значения колебания радиусов обработанной поверхности вала в разных сечениях вала по длине обработки, по которым можно рассчитать погрешность обработки.

Отметим также, что колебание припуска является обязательным фактором, который необходимо учитывать при прогнозировании погрешности обработки партии деталей. В предложенной модели расчета глубины резания колебания припуска учитываются путем шлифования некруглой заготовки эллипсного профиля. Профиль заготовки описывается несколькими радиусами, что позволяет учесть промежуточные значения колебания припуска в его диапазоне варьирования. Такое моделирование гораздо ближе к практике шлифования, так как не бывает абсолютно круглых заготовок.

Таким образом, решение задачи прогнозирования точности обработки возможно при помо-

щи цифрового двойника операции круглого врезного шлифования с ЧПУ, созданного на основе системного моделирования множества взаимосвязанных широкодиапазонных аналитических моделей процессов в единую модель расчета значений фактических подач, силы резания и точности обработки с учетом основных технологических факторов. Рассмотрим основные этапы создания цифрового двойника операции круглого врезного шлифования вала с эллипсным профилем и с переменной податливостью по длине.

Полученные результаты и их обсуждение

Для упрощения примем, что заготовка имеет одинаковый исходный эллипсный профиль во всех сечениях обрабатываемой поверхности вала. Эллипсный профиль описывается четырьмя радиусами. Поэтому каждый оборот заготовки разделен на четыре части и глубина резания будет рассчитываться через каждую четверть оборота на соответствующем радиусе эллипса (рис. 1). Моделировать процесс шлифования эллипсной заготовки начнем с момента касания ее первого радиуса $R_{c,j=1,n=1}$ поверхностью круга.

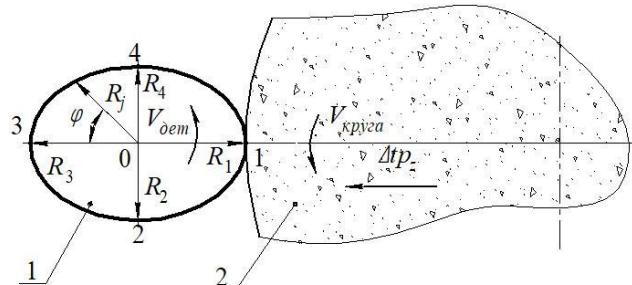


Рис. 1. Начало процесса шлифования с момента касания круга наибольшим радиусом R_1 эллипсной заготовки: 1 – заготовка с эллипсным профилем; 2 – шлифовальный круг
Fig. 1. The beginning of the grinding process, when the wheel contacts the largest radius R_1 of the elliptical workpiece: 1 is a workpiece with an elliptical profile; 2 is a grinding wheel

На рис. 2 приведена схема расчета программной и фактической подач при шлифовании нежесткой заготовки эллипсного профиля.

Исходное радиальное биение заготовки $\Delta R_{заг,c,j}$ принимаем как разность между максимальным радиусом $\Delta R_{заг,max}$ заготовки и текущим радиусом $R_{заг,c,j}$ в сечении вала, она находится внутри диапазона чертежного радиусного допуска $TR_{заг}$ заготовки, то есть $0 \leq \Delta R_{заг,c,j} \leq TR_{заг}$.

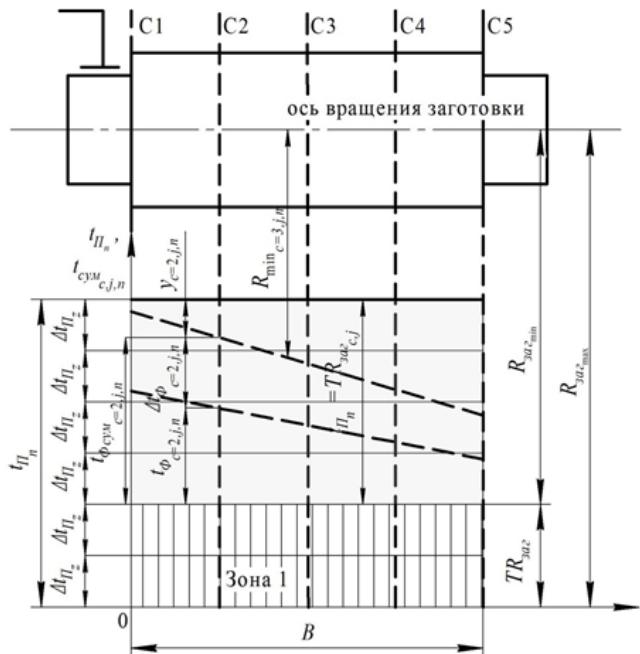


Рис. 2. Схема расчета программной и фактической подач при шлифовании нежесткой заготовки эллипсного профиля: зона 1 – зона исходного радиального биения эллипсного профиля диаметра заготовки (диапазон колебания зазора между кругом и заготовкой, когда исходное радиальное биение эллипсной заготовки больше накопленной программной подачи)

Fig. 2. Scheme for calculating the programmed and actual feeds when grinding a non-rigid workpiece with an elliptical profile: zone 1 is a zone of the initial radial runout of the elliptical profile of the workpiece diameter (the range of oscillation of the gap between the wheel and the workpiece when the initial radial runout of the elliptical workpiece is greater than the accumulated programmed feed)

Поэтому из-за наличия переменного исходного радиального биения между кругом и заготовкой возникает зазор, изменяющийся от 0 до $TR_{заг}$ на разных радиусах эллипсного профиля заготовки, когда исходное радиальное биение $\Delta R_{заг,c,j}$ заготовки больше текущего значения программной подачи Δt_{n_i} . В этом случае происходит «шлифование воздуха», и глубина резания $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}}$ принимается равной нулю. Пока программная подача t_{n_i} не превысит величину зазора $\Delta R_{заг,c,j}$, фактические скорости подачи равны нулю $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}} = 0$.

Тогда математическое условие возникновения зазора можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{\Phi_{c,j,n}} = 0 \text{ при } t_{n_i} \leq \Delta R_{заг,c,j}. \quad (1)$$

Следовательно, шлифование начнется, когда выполнится условие

$$t_{\Pi_n} = \sum_1^n \Delta t_{\Pi_z} > \Delta R_{заг_{c,j}}, \quad (2)$$

где c – порядковый номер сечения; j – порядковый номер радиуса в c -м сечении; n – порядковый номер оборота на z -й ступени; z – порядковый номер ступени в цикле; $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}}$ – глубина

резания (фактическая скорость подачи за оборот) в c -м сечении на j -м радиусе n -м обороте заготовки, мм; t_{Π_n} – программная подача за n -м оборотом заготовки; $\Delta R_{заг_{c,j}}$ – исходное радиальное биение заготовки, мм; Δt_{Π_z} – программируемая врезная подача, мм/об.

Рассмотрим взаимосвязь скоростей программной и фактической подач через баланс накопленных подач и упругой деформации технологической системы за оборот заготовки (см. **рис. 2**). Исходная заготовка имеет эллипсный профиль во всех сечениях с исходным радиальным биением в пределах чертежного допуска на радиус детали $TR_{заг}$. Ось радиусов заготовки изображена в верхней части **рис. 2** и является неподвижной, в то время как режущая кромка круга перемещается на величину программной подачи Δt_{Π_z} и величины упругих деформаций $y_{c,j,n}$.

В соответствии с расчетной схемой на **рис. 2** запишем баланс подач и упругих перемещений с учетом колебания радиусов эллипсного профиля заготовки $\Delta R_{заг_{c,j}}$ в следующем виде (при выполнении условия (1)):

$$t_{\Pi_n} - \Delta R_{заг_{c,j}} = y_{c,j,n} + \Delta t_{\Phi_{c,j,n}} + t_{\Phi_{c,j,n}}, \quad (3)$$

где $t_{\Phi_{c,j,n}}$ – накопленная фактическая подача за предыдущие обороты (часть снятого припуска на сторону за предыдущие обороты) на j -м радиусе в c -м сечении за ($n-1$) оборотов заготовки, мм; $y_{c,j,n}$ – величины упругих деформаций, мм,

$$y_{c,j,n} = \gamma_c P_{Y_{j,n}}, \quad (4)$$

где $P_{Y_{j,n}}$ – радиальная составляющая силы резания на j -м радиусе и n -м обороте заготовки, Н; γ_c – податливость технологической системы в c -м сечении, Н/мм.

Решая уравнение (3) относительно $\Delta t_{\Phi_{c,n}}$, получим

$$\Delta t_{\Phi_{c,j,n}} = t_{\Pi_n} - \Delta R_{заг_{c,j}} - \gamma_c P_{Y_{j,n}} - t_{\Phi_{c,j,n}}. \quad (5)$$

Формула (5) представляет собой математическую модель расчета текущего значения глубины резания (фактической скорости подачи) $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}}$ на каждом n -м обороте и в каждом сечении обрабатываемой поверхности заготовки с эллипсным профилем при известном значении общей радиальной силы резания $P_{Y_{j,n}}$ и величин податливости γ_c в каждом сечении вала.

Для расчета по формуле (5) текущего значения глубины резания необходимо знать значение суммарной силы резания $P_{Y_{j,n}}$, так как расчет упругой деформации $y_{c,j,n}$ в каждом сечении вала ведется по формуле (4) в зависимости от $P_{Y_{j,n}}$. Расчет суммарной силы резания $P_{Y_{j,n}}$ ведется по формулам, полученным в работе [13]:

$$P_{Y_n} = K_3 \Delta t_{\Phi m_n} + K_4 \sqrt{\Delta t_{\Phi m_n}}, \quad (6)$$

$$K_3 = \pi d B n \frac{\sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta}{V_{\text{курга}}}; K_4 = \eta B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{d D}{d + D}}, \quad (7)$$

где $\Delta t_{\Phi m_n}$ – средняя (по длине обрабатываемой поверхности) скорость фактической подачи на z -й ступени цикла и n -м обороте заготовки за оборот заготовки, мм/об; $t_{\Phi m_n}$ – сумма подач $\Delta t_{\Phi m_n}$ за предыдущие ($n-1$) оборотов заготовки; σ_i – интенсивность напряжений в движущемся объеме металла, характеризующая сопротивление металла пластической деформации при ступени, скорости деформации и температуре, присущих процессу шлифования; ε_i – интенсивность скорости деформации объема металла в зоне сдвига, 1/с; η – степень затупления шлифовального круга, равная относительной опорной поверхности круга по площадкам затупления зерен [14]; d – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм; D – диаметр шлифовального круга, мм; B – ширина обрабатываемой поверхности заготовки, мм; $V_{\text{курга}}$ – скорость вращения круга, м/с; n – частота вращения заготовки, мм/мин.

Из формулы (6) видно, что расчет суммарной силы резания $P_{Y_{j,n}}$ ведется в зависимости от средней глубины резания $\Delta t_{\Phi_{m_n}}$ на каждом обороте заготовки, рассчитанной при средней податливости ТС γ_m . После совместного решения уравнений (5)-(7) относительно $\Delta t_{\Phi_{m_n}}$ получим:

$$\Delta t_{\Phi_{m_n}} = \left[\frac{-\gamma_m K_4}{2(1+K_3\gamma_m)} + \sqrt{\left[\frac{\gamma_m K_4}{2(1+K_3\gamma_m)} \right]^2 + \frac{t_{\Pi_n} - \Delta R_{\text{заг}_{c,j}} - t_{\Phi_{m_n}}}{1+K_3\gamma_m}} \right],$$

при $n = 1, t_{\Phi_{m_n}} = 0$. (8)

Формула (8) представляет собой математическую модель расчета средней скорости фактической подачи $\Delta t_{\Phi_{m_n}}$ при средней податливости ТС в течение всего автоматического цикла круглого врезного шлифования с ЧПУ на каждом n -м обороте заготовки с минимальным припуском в зависимости от основных технологических факторов.

Рассмотрим методику расчета глубин резания $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}}$ во всех сечениях вала:

1) по формуле (8) рассчитываем среднюю глубину резания $\Delta t_{\Phi_{m_n}}$ при выполнении условия (1).

В противном случае принимаем $\Delta t_{\Phi_{m_n}} = 0$;

2) по формуле (6) рассчитываем силу резания $P_{Y_{j,n}}$ в зависимости от величины $\Delta t_{\Phi_{m_n}}$;

3) при выполнении условия (1) рассчитываем глубину резания $\Delta t_{\Phi_{\text{ПАК}_{j,n}}}$ в сечении установки ПАК на текущем обороте заготовки по формуле (9) при $\gamma_{\text{ПАК}}$:

$$\Delta t_{\Phi_{\text{ПАК}_{j,n}}} = t_{\Pi_n} - \Delta R_{\text{заг}_{c,j}} - \gamma_{\text{ПАК}} P_{Y_{j,n}} - t_{\Phi_{\text{ПАК}_{j,n}}}, \quad (9)$$

где $t_{\Phi_{\text{ПАК}_{j,n}}}$ – сумма глубин резания в сечении установки ПАК за $(n-1)$ оборотов заготовки; $\gamma_{\text{ПАК}}$ – податливость технологической системы в сечении, где установлен ПАК;

4) вычисляем глубины резания $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}}$ по формуле (5) во всех сечениях вала на текущем обороте заготовки;

5) вычисляем величину снятого припуска с радиусов заготовки во всех сечениях на текущем обороте заготовки:

$$t_{\Phi_{\text{сум}_{c,j,n}}} = \Delta R_{\text{заг}_{c,j}} + \sum_1^n t_{\Phi_{c,j,n}}, \quad (10)$$

$$t_{\Phi_{c,j,n}} = \sum_1^{n-1} \Delta t_{\Phi_{c,j,n}}, \quad (11)$$

где $t_{\Phi_{\text{сум}_{c,j,n}}}$ – накопленная фактическая подача (часть снятого припуска на сторону) в c -м сечении на j -м радиусе за n -й оборот заготовки, мм; $t_{\Phi_{c,j,n}}$ – часть припуска (на радиус), снятого за предыдущие $(n-1)$ оборота заготовки, мм.

6) вычисляем текущее значение радиуса $R_{c,j,n}$ заготовки во всех сечениях на текущем обороте заготовки:

$$R_{c,j,n} = R_{\text{заг}_{\max}} - t_{\Phi_{\text{сум}_{c,j,n}}}, \quad (12)$$

где $R_{\text{заг}_{\max}}$ – максимальный радиус заготовки, мм;

7) в сечении установки ПАК рассчитываем текущее значение диаметра вала d_o как сумму радиуса с j -м номером и противоположного ему радиуса с номером jj , то есть

$$d_o = R_{c,j,n} + R_{c,jj,n}. \quad (13)$$

Производится сравнение текущего диаметра d_o с диаметром $d_{\text{ПАК}_z}$, который является настроенным размером ПАКа:

– если $d_o \leq d_{\text{ПАК}_z}$, то происходит переход на следующую ступень цикла $z+1$, и производим переключение программной скорости подачи Δt_{Π_z} . Расчет повторяется с пункта 1;

– если $d_o > d_{\text{ПАК}_z}$, то расчет повторяется с пункта 1;

– после съема всего припуска диаметр вала d_o достигает последнего настроенного размера, и цикл шлифования заканчивается;

8) рассчитываем максимальные и минимальные радиусы обрабатываемой поверхности в каждом сечении и по всей поверхности. Так как конечные значения радиусов детали формируются на последнем обороте n_{\max} заготовки, то значения радиусов обрабатываемой поверхности будем брать только на последнем обороте. В связи с тем, что эллипсный профиль детали описывается несколькими радиусами, то из всех них надо выбрать максимальный R_{\max_c} и минималь-

ный R_{\min_c} радиус в сечении по следующим формулам:

$$R_{\max_c} = \max_j \{R_{c,j,n}\}, \quad (14)$$

$$R_{\min_c} = \min_j \{R_{c,j,n}\}; \quad (15)$$

9) рассчитываем максимальный $R_{d_{\max}}$ и минимальный $R_{d_{\min}}$ радиусы на всей обработанной поверхности путем выбора предельного радиуса из сечений:

$$R_{d_{\max}} = \max_c \{R_{\max_c}\}, \quad (16)$$

$$R_{d_{\min}} = \min_c \{R_{\min_c}\}; \quad (17)$$

10) рассчитываем максимальные и минимальные диаметральные размеры обрабатываемой поверхности в каждом сечении и по всей поверхности. Поскольку эллипсный профиль детали описывается несколькими радиусами, то в каждом сечении можно рассчитать несколько диаметров как сумму противоположных радиусов и из них выбрать максимальный d_{\max_c} и минимальный d_{\min_c} диаметр в сечении:

$$d_{\max_c} = \max_j \{R_{c,j,n=n_{\max}} + R_{c,jj,n=n_{\max}}\}, \quad (18)$$

$$d_{\min_c} = \min_j \{R_{c,j,n=n_{\max}} + R_{c,jj,n=n_{\max}}\}. \quad (19)$$

Максимальный $d_{d_{\max}}$ и минимальный $d_{d_{\min}}$ диаметры детали на всей обработанной поверхности определяются выбором предельных диаметров из всех сечений, то есть

$$d_{d_{\max}} = \max_c \{d_{\max_c}\}, \quad (20)$$

$$d_{d_{\min}} = \min_c \{d_{\min_c}\}. \quad (21)$$

Прогнозируемая погрешность диаметральных размеров Δ_d рассчитывается как разность максимального $d_{d_{\max}}$ и минимального $d_{d_{\min}}$ диаметров детали по всей длине обработанной поверхности:

$$\Delta_d = d_{d_{\max}} - d_{d_{\min}}. \quad (22)$$

В статье [15] приведена методика расчета по-

грешностей формы и взаимного расположения поверхностей, которая основывается на значениях радиусов обрабатываемых поверхностей, полученных по формулам (12)-(15).

Заключение

1. Прогнозирование точности обработки, включая точность диаметрального размера, формы и расположения поверхностей, при разработке управляющих программ для операций круглого шлифования с ЧПУ является актуальной задачей для современного цифрового машиностроительного производства.

2. Для прогнозирования точности обработки шлифованием разработан цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем, который позволяет прогнозировать погрешности обработки по расчетным значениям радиусов в конце цикла круглого врезного шлифования с учетом влияниями переменных технологических факторов.

3. Основой данного цифрового двойника служит модель одновременного расчета переменной глубины резания на всех участках обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки в зависимости от податливости каждого участка вала по всей длине шлифования. Совокупность переменных глубин резания по всей длине шлифования образует слой снимаемого металла в каждый момент времени.

4. Представленный в статье цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем позволяет рассчитывать текущие размеры обрабатываемой поверхности и спрогнозировать погрешность обработки диаметральных размеров, а также проверить, выполняются ли чертежные требования по форме и расположению обрабатываемых поверхностей [15].

5. Применение цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности в производстве имеет большую практическую значимость, так как позволяет вести автоматизированный контроль управляющих программ для станков с ЧПУ на возможность обеспечения достижимой точности обработки при изготовлении партии деталей.

Список литературы

- Спирин В.А., Красильников М.А., Михайлов А.А. Методология комплексного расчета точности обработки для токарных станков с ЧПУ // Вестник Перм-

- ского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2012. Т. 14. № 2. С. 77–89.
2. Кольцов А.Г. Методика построения математической модели точности технологического оборудования на базе многооперационного станка // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 8(61). С. 106–116.
 3. Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т. Прогнозирование точности при обработке резанием // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 12. С. 63–69.
 4. Chiu H.W., Lee C. Hung. Prediction of machining accuracy and surface quality for CNC machine tools using data driven approach // Advances in Engineering Software. 2017. Vol. 114. Pp. 246–257.
 5. Hangzhuo Yu, Shengfeng Qin, Guofu Ding, Lei Jiang, Lei Han Integration of tool error identification and machining accuracy prediction into machining compensation in flank milling // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 102. Pp. 3121–3134.
 6. Soori M., Arezoo B., Habibi M. Accuracy analysis of tool deflection error modelling in prediction of milled surfaces by a virtual machining system // Int. J. Computer Applications in Technology. 2017, vol. 55(4), pp. 308–321.
 7. Gong Y.D., Wang B., Wang W.S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology / Journal of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 129. Pp. 123–126.
 8. Hecker R.L., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding / International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003. Vol. 43. Pp. 755–761.
 9. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process / International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2002. Vol. 42. Pp. 969–977.
 10. Soler Ya.I., Nguyen Van Le, Nguyen Chi Kien Prediction of shape precision of hardened steel flat parts at pendular grinding with periphery of the abrasive wheel // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. №12–1. С. 128–134.
 11. Soler Ya.I., Nguyen Van Le Modeling and predicting flatness deviations under plane grinding of parts made of 30HGSA hardened steel // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 4 (111). Pp. 54–65.
 12. Лурье Г.Б. Теория рабочего цикла при круглом шлифовании и его автоматизация / Г.Б. Лурье // Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. М.: Машгиз, 1960. С. 87–108.
 13. Акинцева А.В., Переверзев П.П., Ардашев Д.В. Силовая модель процесса внутреннего шлифования / СТИН. 2019. №11. С. 34–37.
 14. Акинцева А.В., Переверзев П.П., Ардашев Д.В. Расчет диапазонов затупления шлифовальных кругов различных характеристик между правками // СТИН. 2019. №11. С. 37–40.
 15. Переверзев П.П., Акинцева А.В. Моделирование ограничений по точности обработки при проектировании оптимальных циклов // Вестник ЮУрГУ. 2016. №2. С. 61–71.

References

1. Spirin V.A., Krasilnikov M.A., Mikhailov A.A. Integrated calculation methodology for processing precision CNC lathes. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science], 2012, vol. 14, no. 2, pp. 77–89. (In Russ.)
2. Koltsov A.G. Methods for building a mathematical model of the accuracy of technological equipment based on a multioperational machine. *Vestnik UGATU* [Bulletin of USATU], 2013, vol. 17, no. 8 (61), pp. 106–116. (In Russ.)
3. Kondrashov A.G., Safarov D.T. Prediction of accuracy in cutting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. [Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering], 2014, no. 12, pp. 63–69. (In Russ.)
4. Chiu H.W., Lee C.Hung. Prediction of machining accuracy and surface quality for CNC machine tools using data driven approach. Advances in Engineering Software. 2017, vol. 114, pp. 246–257.
5. Hangzhuo Yu, Shengfeng Qin, Guofu Ding, Lei Jiang, Lei Han Integration of tool error identification and machining accuracy prediction into machining compensation in flank milling. The Int.J.of Advanced Manufacturing Technology. 2019, vol. 102, pp. 3121–3134.
6. Soori M., Arezoo B., Habibi M. Accuracy analysis of tool deflection error modelling in prediction of milled surfaces by a virtual machining system. Int. J. Computer Applications in Technology. 2017, vol. 55(4), pp. 308–321.
7. Gong Y.D., Wang B., Wang W.S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology. Journal of Materials Processing Technology. 2002, vol. 129, pp. 123–126.
8. Hecker R.L., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003, vol. 43, pp. 755–761.
9. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2002, vol. 42, pp. 969–977.
10. Soler Ya.I., Nguyen Van Le, Nguyen Chi Kien. Prediction of shape precision of hardened steel flat parts at pendular grinding with periphery of the abrasive wheel. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2013, no. 12–1, pp. 128–134. (In Russ.)
11. Soler Ya.I., Nguyen Van Le. Modeling and predicting flatness deviations under plane grinding of parts made of 30KhGSA hardened steel. *Vestnik Irkutskogo gosudar-*

- stvennogo tekhnicheskogo universiteta.* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 4 (111), pp. 54–65. (In Russ.)
12. Lurie G.B. *Teoriya rabochego tsikla pri krugлом shlifovanii i ego avtomatizatsiya. Osnovnye voprosy vysokoproizvoditel'nogo shlifovaniya.* [Theory of an operating cycle for cylindrical grinding and its automation. Key issues for high performance grinding]. Moscow: Mashgiz, 1960, pp. 87–108. (In Russ.)
13. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Ardashev D.V. Power model of an internal grinding process. *STIN* [Machines and Tools], 2019, no. 11, pp. 34–37. (In Russ.)
14. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Ardashev D.V. Calculating bluntness ranges of grinding wheels of different characteristics between dressings. *STIN* [Machines and Tools], 2019, no. 11, pp. 37–40. (In Russ.)
15. Pereverzev P.P., Akintseva A.V. Modeling the constraints on machining accuracy when designing optimal cycles. *Vestnik YuUrGU* [Bulletin of SUSU], 2016, no. 2, pp. 61–71. (In Russ.)

Поступила 15.09.2021; принята к публикации 12.10.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 15/09/2021; revised 12/10/2021; published 24/12/2021

Акинцева Александра Викторовна – кандидат технических наук,
доцент кафедры техники, технологии и строительства,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: akintsevaav@susu.ru. ORCID 0000-0003-0588-1401

Переверзев Павел Петрович – доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: pereverzevpp@susu.ru. ORCID 0000-0002-1416-8918

Дегтярева-Кашутина Анастасия Сергеевна – старший преподаватель,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: asdegyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207

Aleksandra V. Akintseva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering, Technology and Construction, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: akintsevaav@susu.ru. ORCID 0000-0003-0588-1401

Pavel P. Pereverzev – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of the Automated Mechanical Engineering Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: pereverzevpp@susu.ru. ORCID 0000-0002-1416-8918

Anastasia S. Degtyareva-Kashutina – Senior Lecturer,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: asdegyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207