

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.92
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-103-110



МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕКУЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКОМ СТУПЕНЧАТОМ ЦИКЛЕ ПРОГРАММНОЙ ПОДАЧИ НА ОПЕРАЦИИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ С ЧПУ

Акинцева А.В., Переверзев П.П.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. На данный момент в САМ-системах отсутствует какой-либо «цифровой инструмент» прогнозирования стабильностей показателей точности и качества при изготовлении партии деталей. В результате на производствах вынуждены проводить апробацию назначенных режимов резания на выполнение требований чертежа по точности, часто занижая их при этом. Это приводит к снижению производительности современных станков с ЧПУ и делает невозможным проведение цифровизации всей машиностроительной отрасли России. Поэтому решение вопроса прогнозирования стабильности показателей точности и качества при изготовлении партии деталей в «цифровой среде» является актуальной задачей. В качестве решения предложена аналитическая модель съема металла при плоском шлифовании с ЧПУ при ступенчатом изменении программной подачи на глубину и без учета поперечной подачи. Модель устанавливает функциональную взаимосвязь между глубиной резания, упругими деформациями технологической системы и другими параметрами процесса обработки с учетом влияния нестабильных условий формообразования. В результате становится возможным расчет изменения технического размера и погрешности его изготовления на протяжении всего цикла. Данная модель получена 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 аналитической модели съема металла, которая впервые устанавливает взаимосвязь между глубиной резания, режимами резания, упругими деформациями, силами резания и т.д. с точностью обработки на операциях плоского шлифования с ЧПУ. Представленную в данной статье модель съема металла возможно использовать также для оптимизации режимов резания проектируемой операции плоского врезного шлифования. В результате можно сказать о большой практической значимости результатов приводимых исследований для реального машиностроительного производства.

Ключевые слова: плоское шлифование, ЧПУ, модель, глубина резания, цикл, программная подача

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00792.

© Акинцева А.В., Переверзев П.П., 2022

Для цитирования

Акинцева А.В., Переверзев П.П. Модель расчета текущего значения глубины резания в автоматическом ступенчатом цикле программной подачи на операции плоского шлифования с ЧПУ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 103-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-103-110>



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

MODEL OF CALCULATING THE CURRENT VALUE OF THE CUTTING DEPTH IN AN AUTOMATIC STEPWISE CYCLE OF THE PROGRAMMED FEED ON A CNC-CONTROLLED FLAT GRINDING OPERATION

Akintseva A.V., Pereverzev P.P.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Current CAM systems do not have any “digital tool” for predicting the stability of accuracy and quality indicators, when manufacturing a batch of parts. As a result, production units are forced to test the assigned cutting modes for meeting the requirements of the drawing for accuracy, frequently keeping them low at the same time. This leads to a decrease in performance of modern CNC machines and makes it impossible to digitalize the entire machine-building industry in Russia. Therefore, predicting the stability of accuracy and quality indicators, when manufacturing a batch of parts, in a “digital environment” is currently relevant. To solve this issue, an analytical model of metal removal is proposed for CNC-controlled flat grinding with a stepwise change of the programmed feed to a depth, without considering the traverse feed. The model establishes a functional interrelation between the cutting depth, elastic deformations of the technological system, and other parameters of the processing operation, considering the influence of unstable geometry generation conditions. As a result, it becomes possible to calculate changes of the technical size and the error of its manufacturing throughout the entire cycle. This model is designed by a simulation modeling using analytical methods of mathematical modeling that follows the basic 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 the analytical model of metal removal, which establishes the interrelation between the cutting depth, cutting modes, elastic deformations, cutting forces, etc. and the processing accuracy on CNC-controlled flat grinding operations. The model of metal removal presented in this paper can be also used to optimize the cutting modes of the designed operation of flat plunge grinding. As a result, it is possible to say about the great practical significance of the research results for machine-building production.

Keywords: flat grinding, CNC, model, cutting depth, cycle, programmed feed

The research was funded by grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-00792.

For citation

Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Model of Calculating the Current Value of the Cutting Depth in an Automatic Stepwise Cycle of the Programmed Feed on a Cnc-Controlled Flat Grinding Operation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 103-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-103-110>

Введение

Одним из распространенных видов чистовой обработки плоских поверхностей является плоское шлифование периферией круга на станках с прямоугольным столом. Данному виду шлифования присуща сложная кинематика процесса, требующая настройки и управления тремя подачами – скорости стола (м/мин), скорости подачи на глубину (мм/раб. ход) и поперечной подачи (мм/ход). Также наличие осевой подачи круга дает возможность осуществлять различные стратегии съема припуска [1]. В результате съема припуска с обрабатываемой поверхности осуществляется многократно и при различном взаимодействии шлифовального круга с заготовкой. Поскольку на поверхности стола станка размещаются несколько заготовок, которые образуют

суммарную прерывистую поверхность для обработки, это приводит к существенному усложнению моделирования данного процесса из-за необходимости учета переменной ширины контакта круга с обрабатываемой поверхностью и наличия на всей шлифуемой поверхности стола отверстий, пазов, профильных выемок и т.д.

В настоящий момент на подготовительном этапе производства в виду наличия большого числа шлифовальных станков с ЧПУ проектирование управляющих программ (УП) проводится в автоматизированном режиме в CAM-системе почти на всех этапах, за исключением этапа назначения режимов резания, важной частью которого является назначение параметров циклов программных подач.

Несмотря на достаточно богатый выбор CAM-систем различных производителей, они

имеют ряд общих недостатков, делающих невозможным проведение полной цифровизации машиностроительного производства. Во-первых, назначение режимов резания осуществляется по оцифрованным справочникам 60-80-х гг. выпуска, отражающих технические возможности универсального оборудования. Во-вторых, отсутствует какой-либо вид контроля возможности достижения при обработке на данных режимах резания заданных чертежом параметров точности и качества при изготовлении партии деталей. Единственный этап контроля, которые предлагаются почти все САМ-системы, является проверка на возможность столкновения заготовки, режущего инструмента или элемента технологического оборудования, то есть происходит только моделирование траектории передвижения последних. Поэтому на практике в производственных условиях технолог вынужден корректировать вручную режимы резания, опираясь на заводской опыт обработки схожих деталей, а затем еще проводить апробацию назначенных режимов резания на возможность обеспечения ими показателей точности и качества. Зачастую, для гарантированного обеспечения заданных чертежом параметров точности, технологом занижаются режимы резания до безопасного уровня. Следствием таких процессов является низкая производительность операций плоского шлифования на современных мощных и точных станках с ЧПУ. Отметим, что наличие этапов ручного назначения, корректировки и адаптации режимов резания к производственным условиям делает невозможным проведение полной цифровизации машиностроительной отрасли.

Выделим основные работы, посвященные повышению стабильности точности и производительности в цикле при изготовлении партии деталей на операциях плоского шлифования [2-9]. В ряде работ описано формирование отклонений формы обрабатываемых поверхностей, имеющих различную податливость, но при этом использованы статистические методы [2, 3]. Отсутствуют публикации по прогнозированию погрешности обработки, возникающей в цикле при совместном управлении тремя программными подачами на операциях плоского шлифования с ЧПУ. В работах [3, 4] получены эмпирические узодиапазонные модели, устанавливающие взаимосвязь между высотными параметрами шероховатости шлифованной поверхности для конкретных марок материалов. Работы [8, 9] посвящены повышению производительности операций плоского шлифования в автоматическом

цикле, но точность обработки не рассматривается, только качество обрабатываемой поверхности. Большинстве работ, посвященных моделированию силы резания при плоском шлифовании, являются узодиапазонными и ограничиваются определенным перечнем марок материала [10-12]. Отсутствуют публикации по широкодиапазонным моделям расчета силы резания, возникающей в цикле при совместном управлении программными подачами на операциях плоского шлифования, выполняемых на станках с ЧПУ. В первую очередь для успешного прогнозирования точности обработки при разработке математического обеспечения необходимо установить взаимосвязь между глубиной резания и упругими деформациями технологической системы (ТС), которые возникают под действием радиальной силы резания. Рассмотрим основные этапы разработки модели съема металла в автоматическом цикле радиальной подачи на примере плоского шлифования без осевой подачи.

Полученные результаты и их обсуждение

В работе [13] получена аналитическая модель силы резания для процесса плоского врезного шлифования с учетом функциональной взаимосвязи интенсивности съема металла кругом с деформируемыми в зоне сдвига элементарными объемами металла:

$$P_{Y_{z,i}} = M_1 F_{z,i} + M_2 \sqrt{F_{z,i}}, \quad (1)$$

где $P_{Y_{z,i}}$ – радиальная составляющая силы резания на i -м ходе стола z -й ступени, Н; $F_{z,i}$ – фактическая радиальная подача на i -м ходе стола z -й ступени, мм/ход; M_1, M_2 – поправочные коэффициенты, находящиеся по формулам:

$$M_1 = \frac{1,86 V_c T \sigma_i}{V_k \pm V_c}, \quad (2)$$

$$M_2 = \frac{\sigma_i \eta T \sqrt{D}}{3}, \quad (3)$$

где T – ширина шлифования, мм; V_c – скорость движения стола, м/мин; η – степень затупления круга; D – диаметр круга, мм; σ_i – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм²; V_k – скорость круга, м/с.

Из-за наличия податливости в технологической системе плоскошлифовальных станков фактическая подача на глубину шлифовального круга отличается от программной. Этот момент наглядно показан на двух графиках **рис. 1** – гра-

фиках съема припуска на i -м ходе трехступенчатого цикла программной подачи на глубину (при поперечной скорости подачи равной нулю). На **рис. 1, а** представлен график цикла подачи на глубину, в котором прямой и обратный ходы – рабочие, а на **рис. 1, б** прямой ход – рабочий ход (PX), а обратный – выхаживающий ход (BX). На рабочем ходе радиальная подача не равна нулю, а на холостом – равна нулю. При холостом ходе радиальная подача на глубину равна нулю, при этом за счет натяга осуществляется съем неснятой на предшествующих ходах части припуска.

В результате «поведение» фактической подачи на глубину на PX и BX в значительной мере отличается друг от друга. На **рис. 1** представлена последовательность изменения графиков накопленной программной и фактической радиальной подачи в зависимости от i -го номера хода стола и z -й ступени цикла программной подачи на глубину. По сути, **рис. 1** показывает положение «режущей кромки» круга относительно исходного местоположения заготовки (начало координат – неподвижная точка отсчета). Графики на **рис. 2** являются увеличенным выделенным фрагментом **рис. 1**, отображающего содержание прямоугольников АБВГ и ДЕЖИ. Отметим, что на **рис. 1** и **2** программная и фактическая подачи на глубину изображены в виде гистограммы. **Рис. 2, а** отражает случай, когда совершаются ходы PX-PX, а **рис. 2, б** – случай PX-BX.

Отрезок А1А2 (Б1Б2) ограничивает величину накопленной программной радиальной подачи при рабочем ходе (для обоих рассматриваемых случаев прямой ход – рабочий). Данный отрезок показывает величину припуска, который бы снял круг, если бы не было упругих деформаций ТС. При обратном ходе в случае, если сделаны ходы PX-PX (см. **рис. 2, а**), программная радиальная подача равна А2А3, при втором варианте развития события, когда обратный ход холостой PX-BX (см. **рис. 2, б**), программная радиальная подача равна нулю и занимает отрезок Б2Б3, равный Б1Б2 (в данном случае столбцы равны при двойном ходе). Радиальная сила резания в технологической системе вызывает упругие деформации, которые уменьшают величину программной радиальной подачи. Для случая PX-PX – на величину А1А8, а накопленная фактическая радиальная подача (отмечена на **рис. 2, а** отрезком А8А7) – на i -1 ходе стола z -й ступени цикла. Для случая PX-BX возникает упругая деформация на величину Б1Б5, а накопленная фактическая подача отмечена на **рис. 2, б** отрезком Б4Б6 на i -1 ходе z -й ступени. Размер

столбца А8А7А11А10 отражает накопленную фактическую подачу на рабочем ходе, а столбца Б10Б7Б8Б11 – при холостом, там, где съем металла происходит за счет упругой деформации. Величина съема при холостом ходе равна расстоянию Б6Б7, а при рабочем ходе равна А6А7. Отметим, что построение графиков на **рис. 1** и **2** осуществлялась по расчетным формулам, приведенным в данной статье при помощи программного обеспечения Excel. В дальнейшем полученные диаграммы были переведены в графический вид для удобства добавления комментариев.

Из замкнутого контура (см. **рис. 2**) найдем фактическую радиальную подачу:

– для рабочего хода

$$S_{z,i}^P + y_{z,i-1}^X = F_{z,i}^P + y_{z,i}^P; \quad (4)$$

– для холостого хода

$$y_{z,i-1}^P = F_{z,i}^X + y_{z,i}^X, \quad (5)$$

где $S_{z,i}^P$ – программное значение радиальной подачи на рабочем ходе, мм/раб. ход; $y_{z,i-1}^{X(P)}$ – упругая деформация ТС на i -1-м холостом (рабочем) ходе, мм; $F_{z,i}^{P(X)}$ – фактическая радиальная подача на i -м рабочем (холостом) ходе z -й ступени, мм; $y_{z,i}^{X(P)}$ – упругая деформация ТС на i -м холостом (рабочем) ходе, мм.

Объединим формулы (4) и (5) в одну общую, учитывающую наличие программной радиальной подачи на i -м ходе z -й ступени:

$$S_{z,i} + y_{z,i-1} = F_{z,i} + y_{z,i}, \quad (6)$$

где $S_{z,i}$ – программное значение радиальной подачи на i -м ходе z -й ступени, мм/ход*; $y_{z,i}(y_{z,i-1})$ – упругая деформация ТС на i -м (i -1-м) ходе, мм; $F_{z,i}$ – фактическая радиальная подача на i -м ходе z -й ступени, мм.

В уравнении (6) показана функциональная взаимосвязь между величиной снимаемого припуска (фактической радиальной подачей), программной радиальной подачей и упругими деформациями ТС на i -м ходе z -й ступени, которая находится по формуле

$$y_{z,i} = P_{Yz,i} j, \quad (7)$$

где j – податливость технологической системы, м/Н.

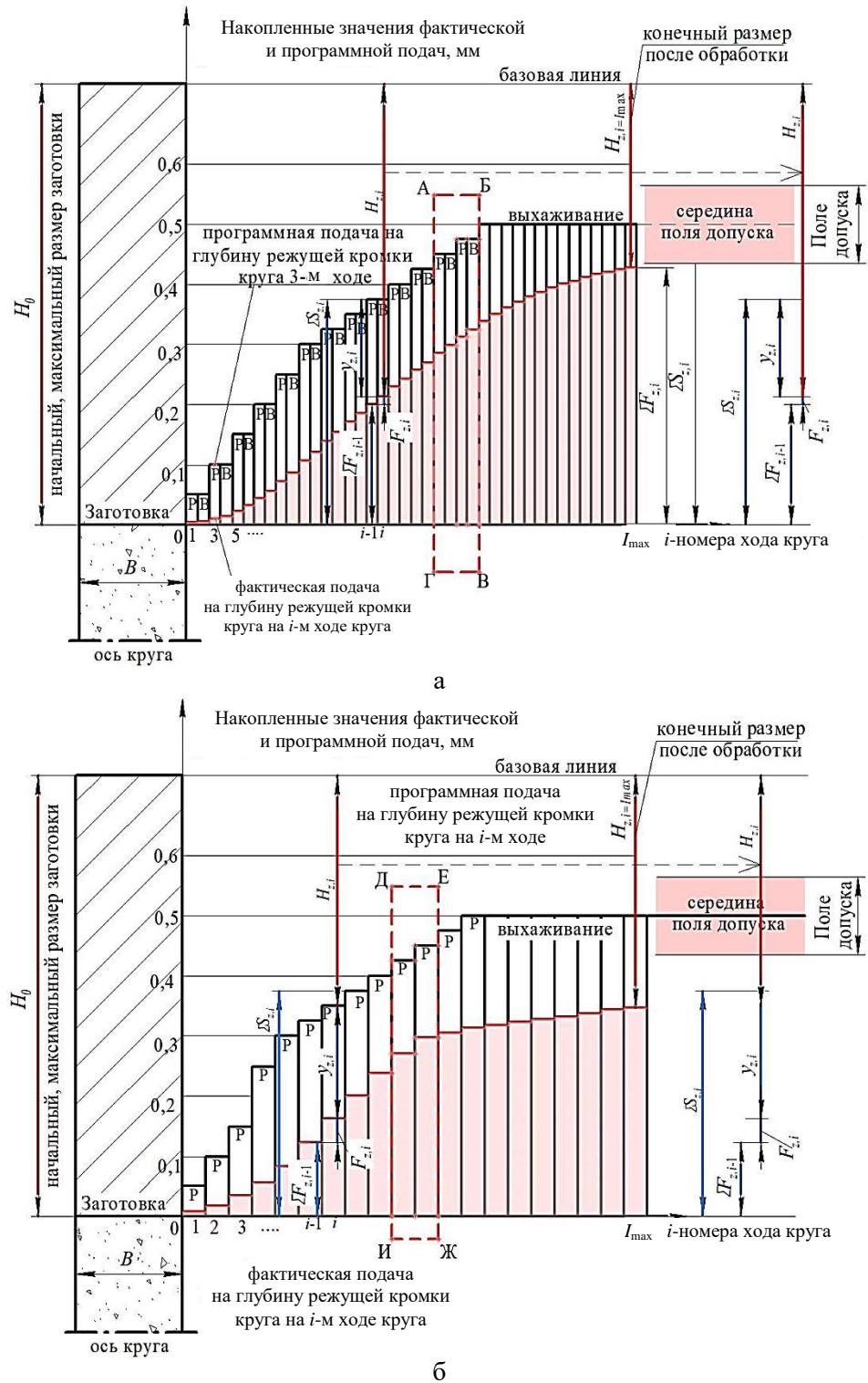


Рис. 1. Графическое представление взаимосвязи накопленных значений фактической и программной подач на глубину для 2-ступенчатого цикла плоского шлифования ($\Sigma S_{z,i}$ ($\Sigma F_{z,i}$) – накопленное значение программной (фактической) подачи на глубину): а – прямой и обратные – рабочие PX-PX; б – прямой ход – рабочий, обратный ход – выхаживающий PX-BX

Fig. 1. Diagram of relations between accumulated values of actual and programmed depth feeds for a 2-step cycle of flat grinding ($\Sigma S_{z,i}$ ($\Sigma F_{z,i}$) is an accumulated value of programmed (actual) depth feed): а is forward and backward travel – operating cycle PX-PX; б is forward travel is operating, and backward travel is spark-out PX-BX

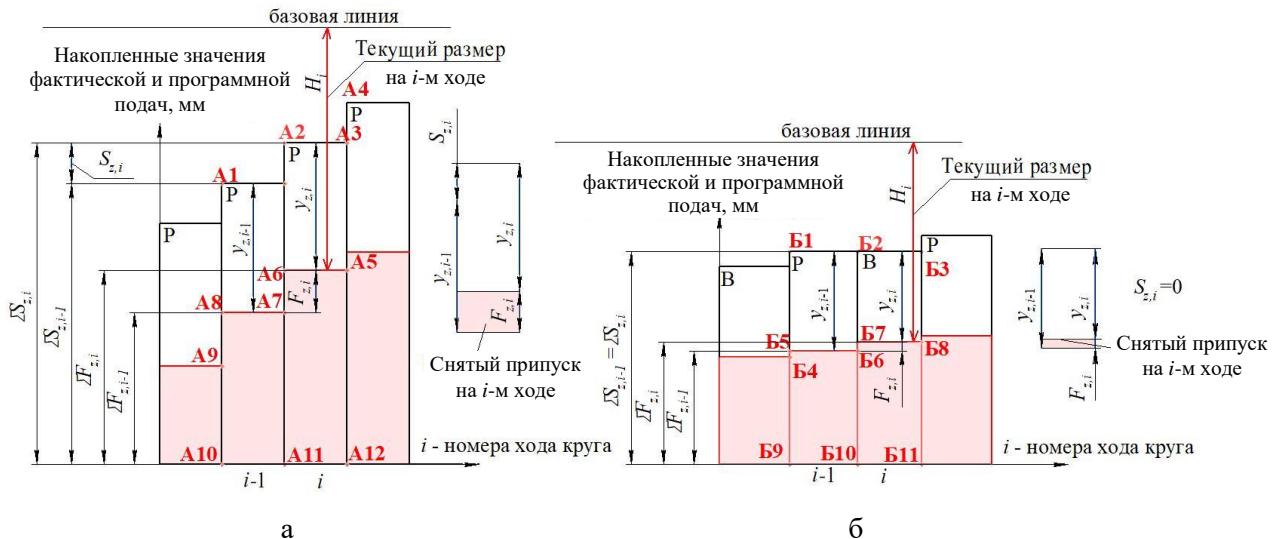


Рис. 2. Графическое представление взаимосвязи накопленных значений фактической и программной радиальных подач для случаев PX-PX (а) и PX-BX (б) в цикле плоского шлифования

Рис. 2. Diagram of relations between accumulated values of actual and programmed radial feeds for cases PX-PX (a) and PX-BX (b) in a flat grinding cycle

Подставив формулу (7) в выражение (6), получим

$$S_{z,i} + P_{Y_{z,i-1}} j = F_{z,i} + P_{Y_{z,i}} j, \quad (8)$$

$$\Delta P_{Y_{z,i}} = P_{Y_{z,i}} - P_{Y_{z,i-1}}. \quad (9)$$

Произведем преобразования, подставив в формулу (8) выражение (9), получим

$$S_{z,i} = F_{z,i} + \Delta P_{Y_{z,i}} j. \quad (10)$$

Выразим из уравнения (10) величину фактической радиальной подачи на i -м ходе z -й ступени, подставив в него радиальную составляющую силы резания:

$$F_{z,i} = \left[\sqrt{\left(\frac{jM_2}{2(1+jM_1)} \right)^2 + \frac{S_{z,i} + jM_1 F_{z,i-1} + jM_2 \sqrt{F_{z,i-1}}}{1+jM_1}} - \frac{jM_2}{2(1+jM_1)} \right]^2. \quad (11)$$

Таким образом, формула (11) является моделью расчета текущего значения глубины резания в автоматическом ступенчатом цикле программной подачи на операции плоского шлифования с ЧПУ. Отметим, что расчет по формуле (11) на первом ходе начинается при условии, что значения программной и фактической радиальной подачи с предшествующего хода принимаются равными нулю для обоих случаев PX-PX и PX-XL.

При известном значении величины фактической подачи на каждом ходе становится возмож-

ным расчет накопленного значения величин фактически снятого припуска через суммирование значений всех подач на глубину на i -м ходе z -й ступени:

$$F_{sum} = \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I F_{z,i}, \quad (12)$$

где Z – максимальное число ступеней цикла (в нашем примере 3); I – максимальное число ходов стола с заготовкой на z -й ступени.

Формула (11) устанавливает функциональную взаимосвязь между величиной снимаемого припуска на i -м ходе z -й ступени входными и выходными параметрами процесса обработки (параметрами станка, параметрами детали, параметрами инструмента и т.д.). Применение формул (11) и (12) дает возможность рассчитать величину снимаемого припуска, что позволит определить технологический размер и его погрешность.

Заключение

1. На операциях плоского шлифования происходит ступенчатое изменение программной подачи на глубину. Обзор литературы показал, что до сих пор не существует моделей и программ расчета текущих значений силы и глубины резания при ступенчатом изменении программной подачи на глубину, что не позволяет разработать методику прогнозирования параметров точности и качества обработки партии деталей для заданных условий операции плоского шлифования с ЧПУ.

2. Назначение режимов резания для операций плоского шлифования производится вручную, что приводит к снижению производительности обработки на современных плоскошлифовальных станках с ЧПУ. Это делает невозможным проведение полной автоматизации расчета режимов резания для УП и цифровизацию технологической подготовки производства.

3. В статье представлена аналитическая модель расчета текущего значения глубины резания в автоматическом ступенчатом цикле программной подачи на операции плоского шлифования с ЧПУ, которая устанавливает функциональную взаимосвязь между глубиной резания, упругими деформациями технологической системы и другими параметрами процесса обработки на протяжении всего цикла плоского врезного шлифования. Полученную модель расчета глубины резания можно использовать при прогнозировании точности обработки, а также для системы оптимизации режимов резания проектируемой операции плоского врезного шлифования с ЧПУ.

Список источников

- Филимонов Л.Н. Плоское шлифование. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985. 109 с.
- Воронов С.А., Вэйдун М.А. Математическое моделирование процесса плоского шлифования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. №4. С. 85-94.
- Ильиных А.С. Формирование качества поверхности при плоском шлифовании торцем круга // Технология машиностроения. 2011. №4. С. 19-22.
- Подборнов И.В., Свирщев В.И. Прогнозирование формирования остаточной шероховатости поверхности при плоском торцовом планетарном шлифовании // СТИН. 2011. №5. С. 36-37.
- Дианов А.А., Татаркин Е.Ю., Терентьев В.А. Образование волнистости при плоском прерывистом шлифовании периферией круга // Ползуновский Вестник. 2009. №1-2. С. 127-131.
- Shipulin L.V., Shmidt I.V. Three-Stage Cycle in Plane Grinding by the Wheel Periphery // Russian Engineering Research. 2020, vol. 40, pp. 347-350. DOI: 10.3103/S1068798X20040218
- Николаенко А.А. Моделирование обеспечения точности обработки при плоском глубинном шлифовании периферией круга // Технология машиностроения. 2011. №5. С. 57-59.
- Михайлин С.М. Силы и контактные температуры при плоском торцовом шлифовании композиционными кругами // СТИН. 2008. №5. С. 31-35.
- Bakša T., Farsky J., Hronek O., Zetek M. Impact of Cutting Speed on Grinding Wheel Wear and Cutting Force when Grinding // Manufacturing Technology. 2018, vol. 18(5), pp. 699-703. DOI: 10.21062/ujep/180.2018/a/1213-2489/MT/18/5/699
- Носенко В.А., Носенко С.В. Плоское глубинное шлифование пазов в заготовках из титанового сплава с непрерывной правкой шлифовального круга // Вестник машиностроения. 2013. №4. С. 74-79.
- Переверзев П.П., Пименов Д.Ю. Модель силы резания при круглом врезном шлифовании с учетом затупления режущих зерен абразивного круга // Трение и износ. 2016. №1(37). С. 76-82.

References

- Filimonov L.N. *Ploskoe shlifovanie* [Flat grinding]. Leningrad: Mechanical engineering, Leningrad branch, 1985. 109 p. (In Russ.)
- Voronov S.A., Weidong M.A. Mathematical modeling of the flat grinding process. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2017, no. 4, pp. 85-94. (In Russ.)
- Ilinykh A.S. Formation of the surface quality at flat grinding with the wheel face end. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Engineering Technology], 2011, no. 4, pp. 19-22. (In Russ.)
- Podbornov I.V., Svirshchev V.I. Prediction of the formation of residual surface roughness during flat end planetary grinding. *STIN* [Machines and Tools], 2011, no. 5, pp. 36-37. (In Russ.)
- Dianov A.A., Tatarkin E.Yu., Terentiev V.A. Undulation formation during flat intermittent grinding by the wheel periphery. *Polzunovsky Vestnik* [Polzunovskiy vestnik], 2009, no. 1-2, pp. 127-131. (In Russ.)
- Shipulin L.V., Shmidt I.V. Three-stage cycle in plane grinding by the wheel periphery. *Russian Engineering Research*, 40, 347-350 (2020). DOI: 10.3103/S1068798X20040218
- Nikolaenko A.A. Modeling of ensuring the accuracy of processing at flat deep grinding by the wheel periphery. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Engineering Technology], 2011, no. 5, pp. 57-59. (In Russ.)
- Mikhailin S.M. Forces and contact temperatures at flat end grinding by composite wheels. *STIN* [Machines and Tools], 2008, no. 5, pp. 31-35. (In Russ.)
- Bakša T., Farsky J., Hronek O., Zetek M. Impact of cutting speed on grinding wheel wear and cutting force when grinding. *Manufacturing Technology*, 18, 699-703 (2018). DOI: 10.21062/ujep/180.2018/a/1213-2489/MT/18/5/699
- Nosenko V.A., Nosenko S.V. Flat deep grinding of slots in titanium alloy workpieces with continuous dressing of the grinding wheel. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research], 2013, no. 4, pp. 74-79. (In Russ.)
- Pereverzev P.P., Pimenov D.Yu. Model of the cutting force at circular plunge grinding, considering the blunting of the cutting grains of the abrasive wheel. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2016, no. 1 (37), pp. 76-82. (In Russ.)

Поступила 27.05.2022; принята к публикации 30.08.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 27/05/2022; revised 30/08/2022; published 26/09/2022

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

Aleksandra V. Akintseva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Engineering, Technology and Construction Department, 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 Automated Mechanical Engineering Technology Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: pereverzevpp@susu.ru. ORCID 0000-0002-1416-8918