

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.92

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-39-47



МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ЦИКЛОВ КРУГЛОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Дегтярева-Кашутина А.С.¹, Дьяконов А.А.²

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

Аннотация. Обеспечение высокого качества изделий и эффективного производства предполагает использование современного прогрессивного оборудования. Особенno важна точность чистовой механической обработки резанием, ярким представителем которой является операция шлифования. Шлифование является одним основным способом финишной обработки закаленных деталей. При этом значимая доля операций шлифования приходится на круглое врезное шлифование. Производительность обработки на станках зависит от режимов резания, назначаемых исходя из марки материала заготовки и требований к точности готовой детали. Вместе со сменой старых станков на новые возникает необходимость пересмотра и нормативной базы. Поэтому разработка новой автоматизированной, высокоэффективной методики расчета циклов круглого шлифования является актуальной задачей для современного машиностроения. Для разработки новой методики проведен анализ текущей ситуации, определены основные ограничения, накладываемые на радиальную подачу, разработаны математические модели для реализации данных ограничений. Разработанная методика проектирования высокоеффективных циклов круглого врезного шлифования позволяет определить рациональное количество ступеней цикла и соответствующие им режимы резания. При проектировании цикла шлифования учитываются материал и размер обрабатываемой поверхности детали, предъявляемые к ней требования, характеристики шлифовального круга и станка. Применение данной методики позволяет производить обработку на максимально производительных режимах резания, обеспечивая выполнение заданных технологических ограничений. Циклы, рассчитанные по разработанной методике, на 30% эффективнее, чем рассчитанные по общемашиностроительным нормативам. В дальнейшем данная методика проектирования циклов станет основой для разработки программного модуля проектирования циклов круглого врезного шлифования для станков с ЧПУ.

Ключевые слова: шлифование, циклы обработки, методика проектирования.

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

© Дегтярева-Кашутина А.С., Дьяконов А.А., 2020

Для цитирования

Дегтярева-Кашутина А.С., Дьяконов А.А. Методика проектирования высокоеффективных циклов круглого врезного шлифования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 39–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-39-47>



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

METHOD OF DESIGNING HIGHLY EFFICIENT CYCLES OF CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING

Degtyareva-Kashutina A.S.¹, Dyakonov A.A.²

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Snezhinsk Institute of Physics and Technology, National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia

Abstract. Ensuring a high quality of products and efficient production involves the use of modern, advanced equipment. This is of particular importance for precision of finishing machining, prominently represented by a grinding operation. Grinding is a main method of finishing of hardened parts. A significant share of grinding operations are cylindrical plunge grinding. Machining performance depends on the cutting conditions set depending on the steel grade of the workpiece and the requirements for accuracy of the finished part. Replacing old machines with new ones leads to the need to revise the regulatory documents. Therefore, the development of a new automated, highly efficient method for calculating cylindrical grinding cycles is more urgent than ever for the machine building industry. To develop a new method, the authors analyzed the current situation, determined the main limitations due to the radial feed, and developed the mathematical models to implement these limitations. The developed method of designing high-performance cylindrical plunge grinding cycles makes it possible to determine a reasonable number of cycle stages and relevant modes. When designing a grinding cycle, the following parameters are taken into account: material and size of the machined workpiece surface, surface requirements, characteristics of the grinding wheel and the machine. This method contributes to machining at the highest performance cutting modes, while complying with the set process limitations. The cycles calculated according to the developed method are 30% more efficient than those calculated according to general machine-building standards. In the future, this method of designing cycles will become the basis for developing a software module for designing cylindrical plunge grinding cycles on CNC machines.

Keywords: grinding, machining cycles, method of designing.

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

For citation

Degtyareva-Kashutina A.S., Dyakonov A.A. Method of Designing Highly Efficient Cycles of Cylindrical Plunge Grinding. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 39–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-39-47>

Введение

Одним из распространенных видов финишной механической обработки является шлифование, которое позволяет обрабатывать заготовки с высокой твердостью поверхностного слоя. При мерно половина всей обработки шлифованием приходится на круглое врезное. Для повышения производительности данного вида операций используются разные приемы, один из них – циклы обработки. В настоящее время существует три метода проектирования циклов обработки: по нормативам и справочникам режимов врезания; с помощью встроенных в СЧПУ подпрограмм; используя аналитические методы.

В производственных условиях для расчетов режимов резания на станках с ЧПУ чаще всего применяют справочники и нормативы времени и режимов резания. Данные общемашиностроительные нормативы [1] имеют ряд допущений. Во-первых, корректирование нормативных значений под конкретное производство производится за счет

эмпирических коэффициентов. Во-вторых, рассчитываемый в нормативах цикл обработки является двухступенчатым, что не всегда эффективно. Справочник «Аbrasivnaya obrabotka» [2] позволяет спроектировать пятиступенчатый цикл обработки, при этом размер последующей подачи в процентном соотношении зависит от предыдущей. Из чего можно сделать вывод, что назначенные режимы резания не всегда позволяют произвести обработку с заданной производительностью при обеспечении качества.

Помимо повышения точности и скорости обработки, неоспоримым преимуществом станков с ЧПУ перед универсальными является наличие системы программного управления и встроенных в неё технологических подпрограмм, которые позволяют в автоматическом режиме создавать цикл для определенного вида обработки. Существенным недостатком данного метода является принцип «черного ящика», то есть неизвестно, по каким параметрам производится расчет режимов резания, следовательно, скорость

обработки и отсутствие брака продолжают зависеть от опыта наладчика станка.

Последний способ разработки эффективных циклов обработки шлифование – это аналитический метод, основанный на математических моделях.

Основой раздела общемашиностроительных нормативов режимов резания [1], посвященного операции круглого врезного шлифования, стала методика П.П. Переверзева [3], основанная на поиске наикратчайшего цикла из возможных, с помощью метода динамического программирования. Предложенная методика позволяет производить оптимизацию циклов шлифования с учетом обеспечения точности и бесприжоговости обработки, обеспечения требуемой шероховатости поверхности детали, а также осыпаемости шлифовального круга. Однако автором не учитываются изменения параметров в процессе обработки, например, температура считается без учета принципа наследования температур и изменения физических свойств обрабатываемого материала.

Следующим этапом развития метода динамического программирования (МДП) стала реализация цифрового двойника [4, 5]. Концепция цифрового двойника служит для виртуального тестирования цикла, рассчитанного МДП, с целью уточнения переменных факторов процесса, а именно износа шлифовального круга, жесткости систем станка, твердости детали и т.п. Если результат проверки неудовлетворительный, цикл дорабатывается. Существенным недостатком метода динамического программирования является его сложность реализации и необходимость иметь большой объем данных, полученных эмпирическим путем.

А.Х. Нуркенов [6] исследовал жесткость технологической системы круглошлифовальных станков и её влияние на производительность обработки. Автором разработана методика определения количества ступеней цикла обработки, исходя из жесткости технологической системы. При разработке цикла обработки учитывается ряд ограничений: по качеству обрабатываемой поверхности, включающее отсутствие прижогов и выполнение требований по шероховатости, по осыпаемости шлифовального круга и по величине упругих деформаций. Автор использует упрощённые зависимости для расчета температуры в зоне резания.

С.В. Lee [7] на основе динамических связей между параметрами процесса разработана нелинейная математическая модель пространства состояний. Данная модель позволяет анализиро-

вать и оптимизировать имеющиеся циклы обработки с помощью датчиков, установленных на станке. Применение данной модели требует дополнительного оснащения станка, что сокращает область и возможности её применения.

В статье N. Shen [8] оптимизация двухступенчатого цикла врезного шлифования, состоящего из черновой и чистовой стадии, производится улучшенным методом дифференциальной эволюции. В качестве лимитирующих параметров для каждой стадии рассматриваются четыре ограничения: бесприжоговость обработки, износ круга, требование по жесткости системы (для черновой стадии) либо производительность (для чистовой стадии). В ходе исследования установлено, что, несмотря на увеличение количества расчетов, предложенное авторами решение позволяет повысить производительность и качество обработки, особенно на черновой стадии. Однако данная методика не универсальна и требует доработки.

В работе Ch. Guo [9] представлены модели для расчета промежуточных и установившихся температур при прерывистом шлифовании. Разработанные модели используют для разработки новых циклов шлифования с переменной рабочей скоростью для увеличения скорости съема материала при сохранении температуры ниже предела возникновения температурных деформаций. В статье R. Dražumerić [10] основным ограничением для формирования цикла шлифования коленчатых валов является бесприжоговость обработки и повышение производительности. В обоих статьях используются эмпирические данные, что сокращает область их применения.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что необходим алгоритм разработки циклов обработки шлифованием, учитывающий основные факторы, влияющие на качество и производительность обработки. К основным факторам относятся: обеспечение бесприжоговости обработки, составляющие силы резания, шероховатость обрабатываемой поверхности.

Полученные результаты и их обсуждение

Перед разработкой методики необходимо определиться, какие данные будут исходными, а какие будут рассчитываться в зависимости от заданных требований. В качестве исходных данных примем: параметры детали; параметры шлифовального круга; параметры станка; режимы резания – частоту вращения детали, скорость вращения круга, шаг изменения подачи при расчете цикла; дополнительные параметры – количество участков по углу и радиусу.

Рассчитываться в процессе будут: припуск на обработку; количество ступеней цикла; радиальная подача на каждой ступени цикла; момент переключения подачи – время и/или снятый припуск.

Первым этапом необходимо определить ряд учитываемых ограничений на радиальную подачу шлифовального круга.

На этапе задания исходных данных реализуется первое ограничение по паспортным данным станка, а именно по мощности, максимальной радиальной подаче и диапазону её изменения:

$$S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max}, \quad (1)$$

где S_{\min} и S_{\max} – минимальная и максимальная радиальная подача по паспорту станка соответственно, мм/мин; S_i – радиальная подача на i -й ступени цикла, мм/мин.

Процесс шлифования от других процессов механической обработки отличает высокая скорость и интенсивное тепловыделение, что в совокупности с предварительной закалкой заготовок приводит к сложности описания физических явлений, происходящих в зоне контакта шлифовального круга и заготовки. Резкие перепады температур могут привести к образованию вторично закаленного и вторично отпущеного слоёв. Для предотвращения структурных изменений вводится второе ограничение по бесприжоговости обработки. Для реализации данного ограничения необходимо разработать математическую модель для определения текущей температуры, которая будет сравниваться с максимально допустимой:

$$U_n - U_{\max, \text{доп}} < 0, \quad (2)$$

где U_n – текущее значение температуры; $U_{\max, \text{доп}}$ – максимально допустимое значение температуры, задаваемое в зависимости от марки стали.

Для расчета температуры в зоне контакта заготовки и шлифовального круга запишем уравнение теплопроводности в полярных координатах:

$$c \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\lambda \partial U}{r \partial r} + \frac{\partial}{r^2 \partial \varphi} \left(\frac{\lambda \partial U}{\partial \varphi} \right), \quad (3)$$

где r – текущий радиус, м; φ – текущий угол; t – время, с; U – температура, °C; c – теплоемкость, Дж/м³·°C; λ – теплопроводность, Дж/м·с·°C.

Краевые условия на пятне контакте (при $r=R$)

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = Q, \quad (4)$$

где Q – мощность теплового источника, Дж/м²·с.

Краевые условия вне пятна контакта (при $r=R$)

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = \alpha (T - U), \quad (5)$$

где T – температура окружающей среды, °C; α – теплоотдача на границе, Дж/м²·°C·с.

Мощность теплового источника рассчитывается по формуле, предложенной в работе С.Н. Корчака [11], которая учитывает тепловыделение от пластического сдвига и трения о вершину абразивного зерна металла:

$$Q = q_{\text{cp}} = \frac{0,8649 \sigma_i v_k \cdot 1,5a + 0,017l_3}{0,56a + 0,17l_3}, \quad (6)$$

где σ_i – интенсивность сопротивления материала деформации, Дж/м; v_k – скорость вращения круга, м/с; l_3 – величина площадки затупления зерна, м, $l_3 = 0,1\text{мм}$; a – толщина среза, м.

Третьим является ограничение по геометрической точности обработки, которая задается на чертеже детали следующими показателями: допуском на диаметральный размер и допусками формы и расположения поверхностей, когда они меньше допуска на размер.

Величина радиальной составляющей силы резания P_y оказывает влияние на отжимы в технологической системе, которые приводят к неравномерному снятию припуска с поверхности заготовки, и как следствие погрешностям формы. В ряде работ [3, 11] установлено, что для обеспечения требуемой точности радиальная составляющая силы резания не должна превышать предельного значения, рассчитываемого исходя из жесткости технологической системы, материала обрабатываемой поверхности, требуемой точности, характеристик режущего инструмента. В.И. Клочко [12] установлено, что при обеспечении одних требований к обрабатываемой поверхности в пределах одной группы сталей по обрабатываемости колебание P_z , а следовательно, и P_y незначительное.

Из описанного выше можно сделать вывод, что помимо ограничения верхней границы радиальной составляющей силы резания при проектировании цикла шлифования, необходимо обеспечивать её постоянство в пределах 10%:

$$\begin{cases} P_y \leq P_{y \text{ пред}}; \\ P_{yi} \cong P_{yi+1} \cong \dots \cong P_{yn}. \end{cases} \quad (7)$$

Разрабатываемая математическая модель радиальной составляющей силы резания основывается на формуле, предложенной С.Н. Корчаком [11]:

$$P_{yi} = 2,311a + 0,289l_3 \sigma_i, \quad (8)$$

где a – толщина среза, мм.

Подобным образом проходит проверка по последнему параметру – качеству поверхностного слоя обрабатываемой детали, а именно шероховатости, поскольку отсутствие прижога учтено в первом ограничении. Данное ограничение применяется к последним ступеням цикла, на которых производится процесс «выхаживания». Требование к шероховатости обрабатываемой поверхности является исходным данным, и при расчетах принимается как предельное значение шероховатости:

$$Ra_i \leq Ra. \quad (9)$$

Для обеспечения требуемой шероховатости поверхности воспользуемся моделью, предложенной Л.В. Шипулиным [13]. Как отмечает сам автор, из-за малого размера длины дуги контакта изгибом можно пренебречь и применить те же принципы, что и для плоского шлифования. Микрорельеф на новом обороте формируется с учетом предыдущего. Расчет среднеарифметического отклонения профиля производится по формуле [13]:

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N h_{i,j}^k - h_i, \quad j \in l_{\text{баз}}, \quad (10)$$

Таким образом, сформированы основные ограничения, накладываемые на величину радиальной подачи в процессе проектирования цикла шлифования. Поскольку не все ограничения применяются от начала и до конца цикла, ниже рассмотрим методику проектирования подробнее.

Рассмотрим алгоритм проектирования цикла на абстрактном примере. Как выше указывалось, ограничение по мощности задано в исходных данных, значит, первое ограничение, которое необходимо проверить на этапе проектирования цикла – это ограничение по бесприжковости.

Расчет температуры и других параметров производится при каждом повороте на угол φ , значение угла зависит от исходных данных, а именно количества участков по углу (**рис. 1**).

Расчет начинается с максимальной подачи S_{\max} , заданной в исходных данных, для максимальной производительности. При превышении максимально допустимой температуры на участке φ_i производится возврат на участок φ_{i-1} и снижение радиальной подачи на один шаг $\Delta S_{\text{рад}}$. Условно это можно представить графиком, приведенным на **рис. 2**. Если однократное снижение подачи не предотвратило появление прижога или температура снизилась на менее 10% от максимально допустимой, то снижение подачи производится повторно на том же участке φ_i .

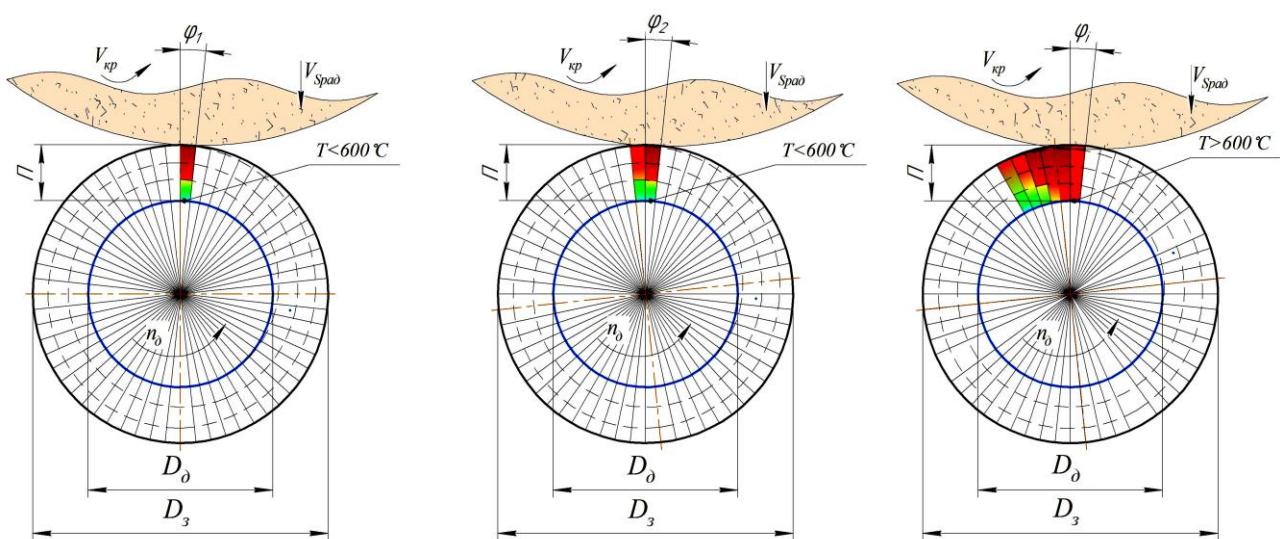


Рис. 1. Последовательность расчетов температуры при шестидесяти участках по углу
Fig. 1. Sequence of temperature calculations for sixty sections by angle

Параллельно с бесприжговостью проверяется ограничение по точности обработки. Увеличение температуры обрабатываемого материала приводит к снижению сопротивления деформации и, как следствие, снижению силы резания. В момент резания, когда температура максимальна, сила резания минимальна, а при снижении температуры сила резания начинает увеличиваться. Если радиальная составляющая силы резания превышает предельное значение, то подача снижается по такому же алгоритму, что и в случае с температурой. Так же производится проверка второго условия – принципа единой радиальной нагрузки.

На последних ступенях цикла, когда припуск остается менее 0,1 мм, на подачу помимо первых двух накладывается ограничение по шероховатости обрабатываемой поверхности.

В итоге на черновой стадии цикла выбор рациональной подачи производится по трем критериям: мощности станка, бесприжговости и точ-

ности обработки, а на чистовой мощность станка уже не является лимитирующим параметром и её место занимает шероховатость (рис. 3). Красными линиями показаны изначальная подача, при которой происходит превышение ограничения по температуре, а зелеными – корректировка с учетом всех ограничений, штриховкой показана область допустимых значений.

Для условий обработки: диаметр детали – 60 мм, частота вращения – 145 об/мин; диаметр шлифовального круга – 600 мм, скорость – 50 м/с, рассчитан цикл по разработанной методике (рис. 4) и по общемашиностроительным нормативам [1] (рис. 5). Как видно из графиков, максимальное время обработки по методике для детали из стали 30ХГСНА составляет 67,7 с, по нормативам для этой же детали время цикла – 115 с. Следовательно, применение методики сокращает время цикла более чем в 1,5 раза.

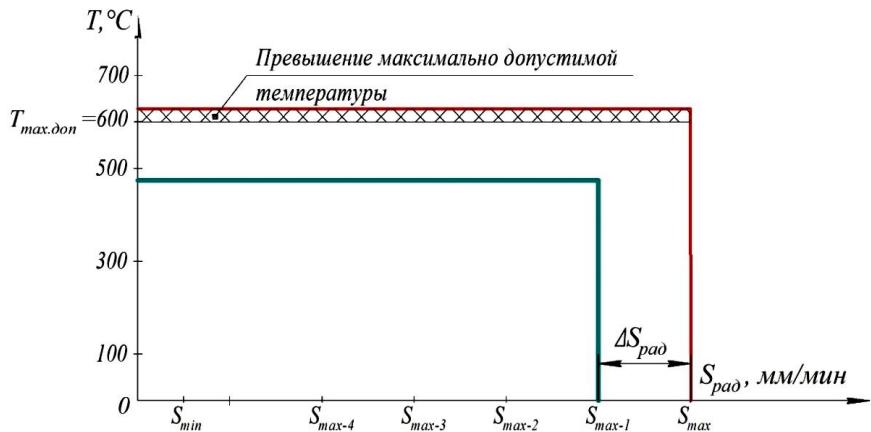


Рис. 2. Снижение радиальной подачи при повышении максимально допустимой температуры
Fig. 2. Reduction of the radial feed with increasing maximum allowable temperature

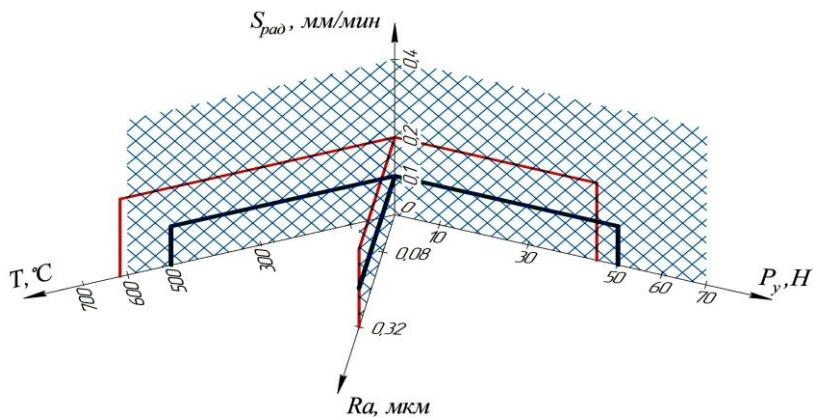


Рис. 3. Определение рациональной подачи на чистовой стадии
Fig. 3. Determination of the reasonable feed at the finishing stage

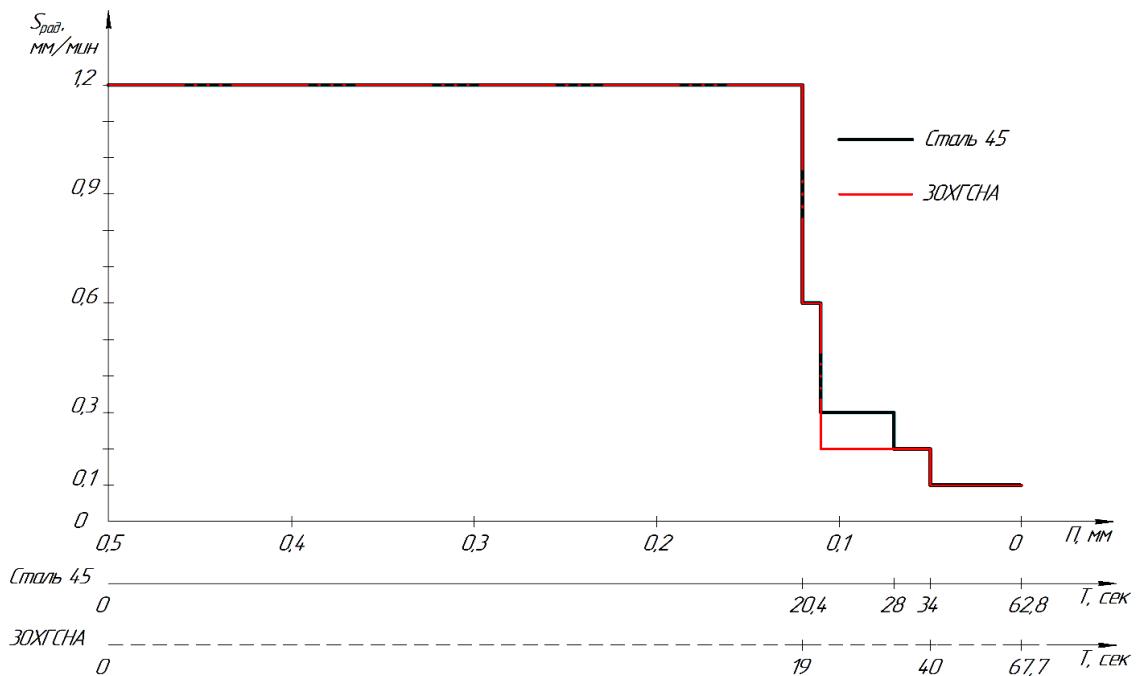


Рис. 4. Цикл обработки, рассчитанный по предлагаемой методике
Fig. 4. The machining cycle calculated by the suggested method

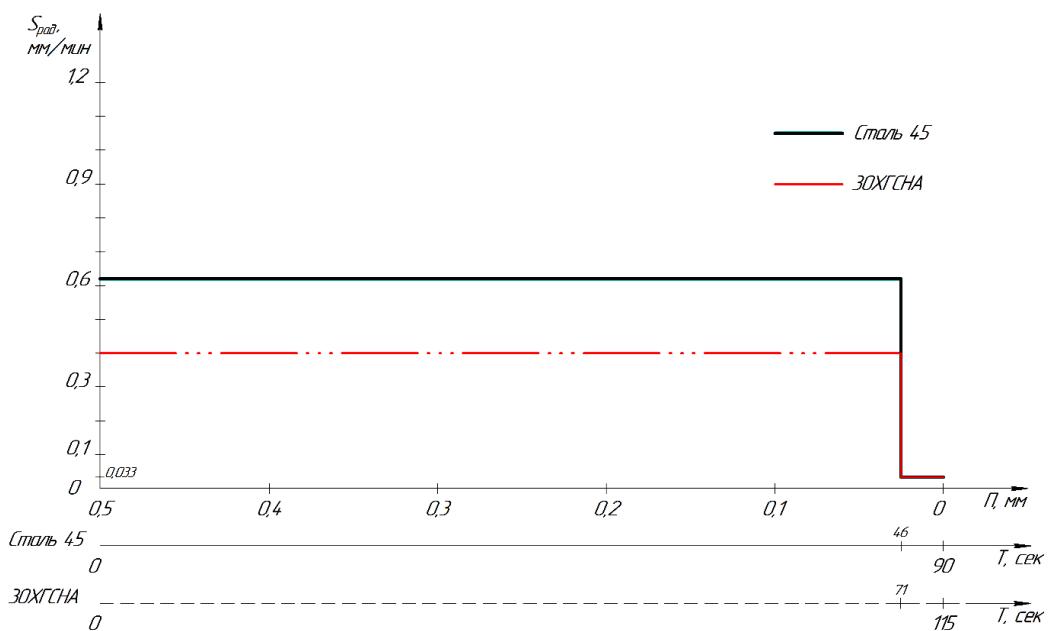


Рис. 5. Цикл обработки, рассчитанный по общемашиностроительным нормативам
Fig. 5. The machining cycle calculated by general machine-building standards

Заключение

Разработана методика проектирования высокоэффективных циклов для операций круглого врезного шлифования, которая в автоматическом

режиме определяет количество ступеней цикла, исходя из материала заготовки и предъявляемых к ней требований, а также характеристик инструмента и станка.

Список литературы

- Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением: справочник / П.П. Переверзев [и др.]. М.: Экономика, 1990. 394 с.
- Вереина Л.И., Краснов М.М., Фрадкин Е.И. Абразивная обработка: справочник / под общ. ред. Л.И. Вереиной. М.: ИНФРА-М, 2017. 304 с.
- Переверзев П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08/ Павел Петрович Переверзев. Челябинск, 1999. 36 с
- Pereverzev P.P., Akintseva A.V. Modeling of metal removal during an internal grinding in view of kinematics cutting features // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 10. P.888–893.
- Переверзев П.П., Акинцева А.В., Алсигар М.К. Применение цифрового двойника при прогнозировании надежности управляющих программ для станков с ЧПУ // Инновации в машиностроении. 2018. С. 228–232.
- Нуркенов А.Х. Проектирование многоступенчатых циклов круглого врезного шлифования для станков с ЧПУ // Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения. 2016. С. 151–153.
- Lee C.W. A control-Oriented Model for the Cylindrical Grinding Process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. Vol. 44. No. 7–8. P. 657–666.
- An Improved Differential Evolution (IDE) Based on Double Populations for Cylindrical Grinding Optimization/ Nanyan Shen; Yongyi He; Jing Li; Minglun Fang// 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, IEEE Xplore. 2009. Number: 10835217. DOI: 10.1109/ICMTMA.2009.370
- Changsheng Guo, Yan Chen. Thermal modeling and optimization of interrupted grinding // CIRP Annals. 2018. Vol. 67, Iss. 1. P. 321–324. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.083>
- Temperature-based method for determination of feed increments in crankshaft grinding/ Radovan Dražumerič, Roope Roininen, Jeffrey Badger, Peter Krajnik// Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 259. P. 228–234.
- Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М., Машиностроение, 1974. 280 с.
- Клочко В.И. Эффективность высокоскоростного шлифования разных сталей и сплавов с учетом точности и качества обработки: дис. ... канд. техн. наук / Клочко Валентин Иванович. Челябинск, 1984. 207 с.
- Shipulin L.V., D'yakonov A.A. Imitation model of forecasting surface relief when forming it during cylindrical grinding // Procedia Engineering. 2016. С. 936–941.

References

- Pereverzev P.P. et al. *Obshchemashinostroitelnye normativy vremeni i rezhimov rezaniya dlya normirovaniya rabot, vypolnyayemykh na universalnykh i mnogotselevykh stankakh s chislovym programmnym upravleniyem: spravochnik*. [General machine-building standards for time and cutting modes for standardizing work performed on universal and multi-purpose computer numerical control machines: a reference book]. Moscow: Economics, 1990, 394 p. (In Russ.)
- Vereina L.I., Krasnov M.M., Fradkin E.I. *Abrazivnaya obrabotka: spravochnik* [Abrasive processing: a handbook] Moscow: INFRA-M, 2017, 304 p. (In Russ.)
- Pereverzev P.P. *Teoriya i metodika rascheta optimalnykh tsiklov obrabotki detalei na krugloshlifovalnykh stankakh s programmnym upravleniyem: avtoreferat dis. dokt. tekhn. nauk* [Theory and methodology for calculating the optimal processing cycles of parts on computer controlled circular grinding machines: Extended abstract of the doctoral thesis]. Chelyabinsk, 1999, 36 p.
- Pereverzev P.P., Akintseva A.V. Modeling of metal removal during an internal grinding in view of kinematics cutting features. Russian Engineering Research 36, 10, 888–893 (2016).
- Pereverzev P.P., Akintseva A.V., Alsigar M.K. Application of the digital twin in predicting the reliability of control programs for CNC machines. *Innovatsii v mashinostroenii* [Innovations in Mechanical Engineering], 2018, pp. 228–232. (In Russ.)
- Nurkenov A.Kh. Design of multi-stage cylindrical plunge grinding cycles for CNC machines. *Naukoemkie tekhnologii na sovremennom etape razvitiya mashinostroeniya* [Science-intensive technologies at the present stage of mechanical engineering development], 2016, pp. 151–153. (In Russ.)
- Lee C.W. A control-oriented model for the cylindrical grinding process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44, 7–8, 657–666 (2009).
- Shen Nanyan, He Yongyi, Li Jing, Fang Minglun. An improved differential evolution (IDE) based on double populations for cylindrical grinding optimization. 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, IEEE Xplore, 10835217 (2009) DOI: 10.1109/ICMTMA.2009.370
- Changsheng Guo, Yan Chen. Thermal modeling and optimization of interrupted grinding. CIRP Annals. 67, 1, 321–324 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.083>
- Radovan Dražumerič, Roope Roininen, Jeffrey Badger, Peter Krajnik. Temperature-based method for determination of feed increments in crankshaft grinding. Journal of Materials Processing Technology, 259, 228–234 (2018).
- Korchak S.N. *Proizvoditelnost protsessa shlifovaniya stalnykh detalei* [Steel parts grinding performance]. Moscow: Mechanical Engineering, 1974, 280 p. (In Russ.)

12. Klochko V.I. *Effektivnost vysokoskorostnogo shlifovaniya raznykh stalei i splavov s uchetom tochnosti i kachestva obrabotki: dis. ... kand. tekhn. nauk* [The efficiency of high-speed grinding of different steels and alloys, taking into account the accuracy and quality of processing: Ph.D. dissertation]. Chelyabinsk, 1984, 207 p.
13. Shipulin L.V., D'yakonov A.A. Imitation model of forecasting surface relief when forming it during cylindrical grinding. Procedia Engineering, 936–941 (2016).

Поступила 27.08.2020; принята к публикации 15.10.2020; опубликована 25.12.2020
Submitted 27/08/2020; revised 15/10/2020; published 25/12/2020

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

Дьяконов Александр Анатольевич – доктор технических наук, доцент
Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия.
Email: sigma-80@mail.ru. ORCID 0000-0001-8384-6359

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

Alexander A. Dyakonov – DrSc (Eng.), Associate Professor
Snezhinsk Institute of Physics and Technology,
National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia.
Email: sigma-80@mail.ru. ORCID 0000-0001-8384-6359