

УДК 621.9  
На правах рукописи

Нуркенов Антон Халилович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО  
ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ ЗА СЧЕТ УЧЕТА  
ФАКТИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА  
СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИКЛА ШЛИФОВАНИЯ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва, 2016

Работа выполнена в «Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)

Научный руководитель:

**Гузеев Виктор Иванович**  
доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Технология автоматизи-  
рованного машиностроения»

Официальные оппоненты:

**Козлов Александр Михайлович**  
доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Технология машино-  
строения»  
«Липецкого государственного технического  
университета»

**Носенко Владимир Андреевич**  
доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Технология и оборудо-  
вание машиностроительных производств»  
«Волжского политехнического института  
(филиал) ВолгГТУ»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное обра-  
зовательное учреждение высшего профессио-  
нального образования «Ульяновский государст-  
венный технический университет» (УлГТУ)

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2016 г., в \_\_\_\_\_ на заседании диссертаци-  
онного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом универси-  
тете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного  
технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)  
Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Телефон для справок 8(499) 267-09-63

Ученый секретарь совета  
д.т.н., доцент



В.П. Михайлов

**Актуальность.** Одним из основных методов финишной обработки, характеризующихся малой величиной припуска и высокими требованиями по точности, форме и качеству поверхности изделия, является шлифование. Обширную группу операций шлифования составляет круглое врезное шлифование на станках с ЧПУ. Для станка с программным управлением важнейшим этапом проектирования технологического процесса является разработка управляющей программы (УП). Наиболее полное использование технологического потенциала оборудования при проектировании управляющей программы, представляет для технолога сложную задачу. Существующие кругло шлифовальные станки, имеют различные диапазоны регулирования режимных параметров и технологические возможности. При этом в процессе врезного шлифования, из-за наличия упругих перемещений в технологической системе (ТС) и инерционности перемещающихся масс (шлифовальной бабки с кругом), фактическая скорость подачи, при ступенчатом переключении программной (заданной) скорости подачи, изменяется с запаздыванием по времени. Следовательно, программная скорость подачи не может быть применена для расчета основного времени. Установление зависимости между фактической и заданной подачами в зависимости от жесткости ТС является одной из главных задач разработки управляющих программ.

Существующие методы проектирования циклов шлифования основываются на эмпирических данных предприятий, нормативных справочных материалах. При этом следует отметить, что цикл проектируется для заранее заданного количества ступеней цикла. Данные об эксплуатации на производстве круглошлифовальных станков с ЧПУ показывают, что программная скорость подачи подбирается наладчиком опытным путем для каждой новой детали. Что приводит к большим материальным и временным затратам, поскольку необходимо провести пробную обработку каждой шлифуемой поверхности детали при различных значениях программной скорости подачи в цикле для каждой детали или тестовой детали, выбранной случайным образом из партии. В условиях серийного и мелко-серийного производства (для небольших и часто меняющихся партий заготовок), временные затраты на отладку УП на основе подбора параметров цикла шлифования составляют до 30-40 % от общего времени обработки детали или партии деталей. В результате, для гарантированного обеспечения конструкторских требований к детали чаще всего назначается цикл шлифования с заведомо заниженными программными скоростями подач. Учитывая большое количество проектируемых операций круглого врезного шлифования и ограниченные сроки их проектирования, а также вариативность возможных технологических решений на основе регулирования параметров цикла путем пробной обработки заготовки, становится очевидной необходимость автоматизированного расчета цикла шлифования, учитывающего жесткость ТС для каждого конкретного изделия, партии изделий.

**Целью** работы является повышение производительности операции круглого врезного шлифования на станках с ЧПУ за счет формирования цикла шлифования для конкретной технологической системы с учетом ее фактической жесткости.

**Задачи**, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Разработать способ определения жесткости технологической системы для конкретных условий обработки.
2. Разработать методику моделирования силового взаимодействия шлифовального круга и заготовки в процессе круглого врезного шлифования, учитывающую фактическую жесткость ТС с возможностью ее реализации системой ЧПУ станка.

3. Разработать методику проектирования оптимального цикла круглого врезного шлифования для станков с ЧПУ, формирующую параметры ступеней цикла на основе тестирования жесткости ТС и учитывающую допустимую частоту вращения заготовки.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Разработана методика проектирования операции круглого врезного шлифования на основе двух уровневой оптимизации, отличающаяся тем, что количество ступеней цикла определяется на основе расчета для конкретной технологической системы.

2. Разработаны математическая модель определения текущего радиуса заготовки в процессе обработки с учетом фактической жесткости технологической системы с возможностью реализации на станочном персональном компьютере.

3. Расчетным путем установлен новый научный факт, который был экспериментально подтвержден, что при изменении жесткости ТС в интервале  $0,08 \cdot 10^7$  до  $0,38 \cdot 10^7$  Н/м основное время цикла изменяется в интервале от 285 до 78 секунд при обеспечении заданной точности и шероховатости поверхности детали.

**Практическая ценность** работы определяется тем, что:

1. На основе методики разработан и внедрен руководящий технический материал (РТМ) «Проектирование циклов круглого врезного шлифования на станках с ЧПУ с учетом фактической жесткости технологической системы» на предприятиях машиностроительной отрасли.

2. Разработан программный модуль, позволяющий определять изменение радиуса заготовки в процессе обработки по спроектированному циклу с учетом фактической жесткости технологической системы.

3. Разработан способ «Определение жесткости технологической системы круглошлифовального станка с ЧПУ» (патент на изобретение РФ № 2568553 с приоритетом от 16.06.2014, авторы Гузев В.И., Нуркенов А.Х., заявитель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

**Методы исследования.** Использовались фундаментальные положения теории технологии машиностроения, теории резания при лезвийной и абразивной обработке, законы теории теплопроводности твердых тел, современные методы постановки экспериментальных исследований и статистическая обработка результатов исследований.

**На защиту выносятся следующие положения:**

– способ определения жесткости технологической системы для конкретных условий обработки;

– методика моделирования силового взаимодействия шлифовального круга и заготовки в процессе круглого врезного шлифования, учитывающая фактическую жесткость технологической системы с последующей реализацией в системе ЧПУ станка;

– методика проектирования операции круглого врезного шлифования на основе двух уровневой оптимизации.

**Апробация.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: третья, четвертая, пятая и шестая научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ. Челябинск, 2011, 2012, 2013, 2014; 63, 64, 65 и 66-й научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, соискателей и магистрантов в ЮУрГУ. Челябинск, 2011, 2012, 2013, 2014; региональная конференция «Молодежь. Наука. Инновации-2011». Челябинск, 2011; четвертая, пятая, шестая и седьмая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России».

Москва, 2011, 2012, 2013, 2014; XI Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Механики XXI века». Братск, 2012; 7 международная конференция «Информационные технологии в промышленности». Минск (Белоруссия), 2012; VIII Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании». Варна (Болгария), 2012; LIV Международная научно-техническая конференция «Достижения науки – агропромышленному производству». Челябинск, 2015. Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы, соглашение 14.577.21.0170.

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 18 научных работах, из которых 5 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ; 2 – в зарубежных изданиях, входящих в список Scopus. Получен патент на изобретение РФ №2568553. Общий объем публикаций 4,33 п.л. Список публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов и списка литературы (164 наименования). Работа изложена на 135 страницах машинописного текста, включает 108 рисунков и 15 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Теоретические предпосылки работы**

В работе произведен обзор методов проектирования операции круглого врезного шлифования. Основные исследования в этом направлении приведены в работах Ю.В. Барановского, Б.С. Балакшина, В.А. Иоголевича, С.Н. Корчака, Е.П. Калинина, А.А. Кошина Г.Б. Лурье, Е.Н. Маслова, В.Н. Михелькевича, Ю.И. Манохина, П.П. Переверзева, П.И. Ящерицына и др. В результате анализа условно выделяются следующие направления в проектировании цикла шлифования: на основе эмпирических данных предприятия; применения нормативных справочных материалов; на основе моделирования процесса с учетом технологических ограничений. Результатом проектирования является рабочий цикл шлифования. В работах Б.С. Балакшина, Б.М. Базрова, Г.Б. Лурье, Е.Н. Маслова, А.П. Соколовского, А.Г. Савицкой, П.И. Ящерицына предлагаются рациональные циклы для конкретных условий обработки, что сужает условия их применения.

Рассмотрена методика проектирования цикла шлифования на основе оптимального управления процессом шлифования (принцип максимума Л.С. Понтрягина), применяемая в работах Д.В. Каленника, В.Л. Кулыгина, А.И. Левина, В.М. Машинистова, Ю.И. Манохина, в которых задается в качестве управляющего параметра косвенная оценка составляющей силы резания  $P_y$ . Известным является факт, что косвенная оценка силы резания, например, через мощность привода, ведет к грубой погрешности моделирования.

В работах В.А. Иоголевича, В.Н. Михелькевича, М.М. Тверского в качестве базового параметра, характеризующего процесс обработки, задается постоянная времени, как величина учитывающая динамику процесса шлифования. Предлагаемые методики позволяют проектировать циклы только для заранее заданного количества ступеней цикла с учетом косвенной оценки динамики процесса резания.

Комплексный метод моделирования процесса шлифования с учетом ряда технологических ограничений при проектировании цикла шлифования предложен Е.П. Калининым, А.М. Козловым, П.П. Переверзовым, Л.В. Шипулиным. Однако, подход, предложенный авторами, позволяет проектировать цикл шлифования

только для заранее заданного количества ступеней цикла шлифования и учитывается только статическая (паспортная) жесткость технологической системы.

Исследования динамики в технологической системе в процессе шлифования рассмотрены в работах Н.А. Дроздова, В.Г. Евтухова, А.И. Каширина, В.А. Кудинова, О.С. Ломовой, И.Л. Худобина, М.Е. Эльясберга. Однако в работах авторов нет методики проектирования цикла, а предложены рекомендации по проектированию рациональных циклов шлифования с учетом амплитудно-частотных характеристик технологической системы. При этом установлено существенное влияние жесткости технологической системы на процесс обработки.

Анализ существующих методов проектирования цикла шлифования показал, что: справочные материалы предназначены для станков с ручным управлением; подбор параметров цикла шлифования осуществляется на основе пробной обработки заготовки; отсутствует нормативная база по циклам шлифования, при этом постоянно увеличивается номенклатура изделий и оборудования; количество ступеней цикла является величиной заранее заданной, что существенно снижает область поиска оптимального цикла; при проектировании учитывается только статическая жесткость технологической системы.

### **Способ определения жесткости технологической системы для фактических условий обработки**

Методы определения жесткости технологической системы. Автором рассмотрены основные методы определения жесткости ТС: статическая нагрузка и разгрузка заготовки, закрепленной в центрах; обработка закрепленной на оправке заготовки с последующим измерением максимальных и минимальных отклонений диаметра детали через косвенное определение постоянной времени, посредством оценки мощности главного привода или на основе передаточного коэффициента изменения силы резания. Недостатком первого способа (на основе применения тарированных грузов) является отсутствие учета динамики процесса шлифования при расчете жесткости технологической системы. Это приводит к погрешности при расчете других параметров шлифования. Второй способ также характеризуется погрешностью измерений по результатам контроля параметров заготовки. Первый и второй способ носит исследовательский характер. Для последующих методов следует отметить высокую трудоемкость расчетов параметра жесткости, а также продолжительное время исследования при изменении условий эксперимента. Косвенная оценка искомого параметра через другие параметры ТС приводит к определенной кумулятивной погрешности в результате расчета параметров цикла.

В виду сказанного выше условно можно разделить способы оценки жесткости технологической системы на две основные группы: определение статической жесткости и динамической жесткости. При этом в исследованиях различных авторов доказана существенная разница получаемого параметра жесткости от способа его измерения. Поэтому, в качестве исходного метода автор предлагает метод на основе прямого измерения диаметра заготовки прибором активного контроля (ПАК) в процессе шлифования.

Измерение диаметра заготовки в процессе шлифования прибором активного контроля. Применение прибора активного контроля заключается в следующем (Рис. 1): шлифовальный круг 1 с радиальной подачей  $S_{\text{рад}}$ , мм/об и скоростью резания  $V_k$ , м/с врезается в заготовку 2 с максимально и минимально-фиксируемым диаметром  $\varnothing_{\text{max}}$  ( $\varnothing_{\text{min}}$ ), вращающуюся с окружной скоростью  $V_d$ , м/мин. Разница диаметров заготовки характеризует исходное биение  $\delta$ . В процессе удаления припуска производится фиксация диаметра заготовки  $D_i$ , который записывается при-

бором активного контроля в массив данных  $x_i$ . Сигнал обрабатывается при помощи разработанного контроллера с аналогово-цифровым преобразователем 3.

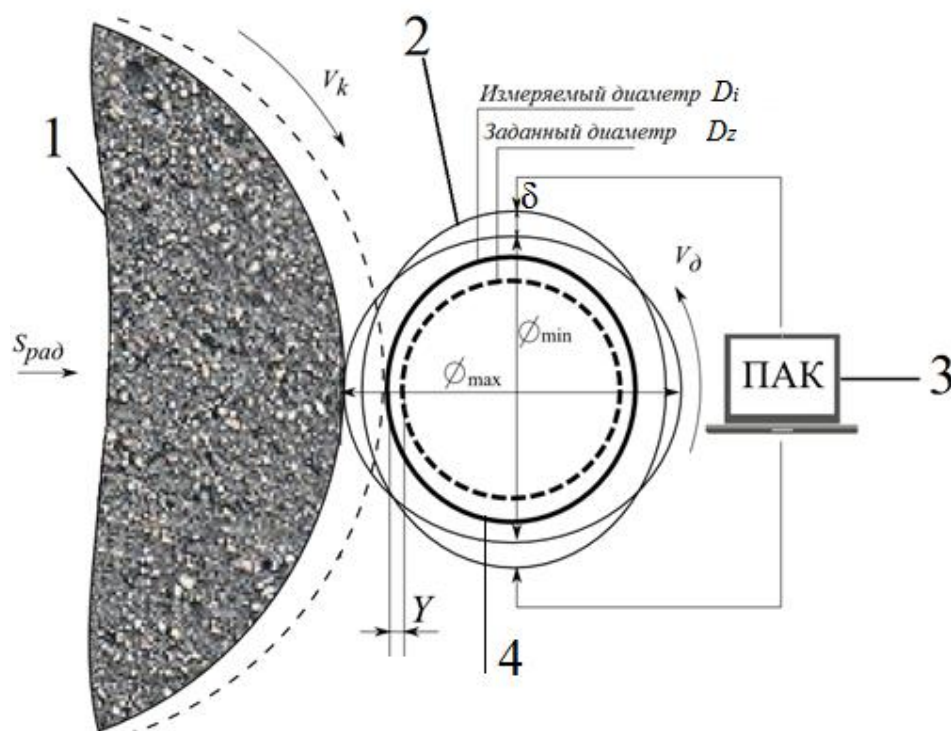


Рис. 1. Схема определения динамической жесткости ТС круглошлифовального станка с ЧПУ

На основе разницы между измеренным  $D_i$  и заданным диаметрами  $D_z$  обработанной детали 4, определяются упругие деформации  $Y$  в технологической системе:

$$\frac{D_i - D_z}{2} = Y. \quad (1)$$

Далее рассчитывается радиальная составляющая силы резания  $P_y$ . В качестве расчетного уравнения выбрано уравнение Е.П. Калинина, которое позволяет использовать параметры цикла шлифования (режимы резания, параметры инструмента и заготовки):

$$P_y = \sigma_s \cdot S^{0.5} \cdot B \cdot \left[ 0,59 \cdot V_s \cdot S^{0.5} \cdot V^{-1} + 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{d \cdot D_{кр}}{d + D_{кр}} \right)^{0.5} \cdot K_3 \right]. \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – предел прочности материала, МПа;  $S$  – радиальная подача ШК за оборот детали, мм/об;  $D_{кр}$  – диаметр шлифовального круга, мм;  $d$  – диаметр заготовки, мм;  $V_s$  – окружная скорость заготовки, м/мин;  $V$  – скорость резания м/с;  $B$  – ширина шлифования, мм;  $K_3$  – коэффициент затупления шлифовального круга.

В результате по выражениям (1) и (2) рассчитывается жесткость технологической системы [47]:

$$\frac{2P_y}{D_i - D_z} = I_{\phi}. \quad (3)$$

где  $I_{\phi}$  – фактическая жесткость технологической системы.

На основе предложенного автором способа становится возможным повысить точность и производительность процесса круглого врезного шлифования на станке с ЧПУ за счет назначения оптимальной предельной радиальной подачи для каждой ступени цикла шлифования при конкурентных условиях обработки. Получен патент на изобретение № 2568553 с приоритетом от 16.06.2014 «Способ опре-

деления жесткости технологической системы круглошлифовального станка с ЧПУ», авторы Гузеев В.И., Нуркенов А.Х., заявитель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

С целью проверки достоверности результатов определения жесткости разработанным способом произведена дополнительная серия экспериментов по определению жесткости технологической системы при помощи тарированных грузов и виброанализаторов LMS Scadas Mobile, ДИАМEX2000. Экспериментальное исследование жесткости узлов технологической системы станка с ЧПУ проводились на базе исследовательской лаборатории кафедры «Технология машиностроения» и НИЦ «Экспериментальная механика» ФГБОУ ВПО Южно-Уральского государственного университета. Обработка результатов эксперимента производилась по методике расчета жесткости технологической системы В.А. Кудинова. Значения жесткостей, определяемых разработанным способом, совпадает со значениями полученными на основе измерения виброперемещений узлов ТС со среднеарифметической погрешностью в 7%.

### **Математическое моделирование радиуса заготовки в процессе круглого врезного шлифования**

Моделирование параметров абразивной обработки произведено у многих исследователей. Каждый автор устанавливал ряд допущений, с целью упрощения расчетов при моделировании. При этом, современные модели отличаются своей трудоемкостью и продолжительностью расчета. Поэтому возникают трудности в их эффективном применении в системе ЧПУ шлифовального станка. Таким образом, для формирования оптимальных параметров цикла шлифования путем их расчета в системе ЧПУ станка в условиях многономенклатурного производства необходима не требовательная к аппаратной составляющей модель, учитывающая состояние технологической системы при обработке конкретной заготовки. В модели предлагается учитывать состояние ТС в зависимости от её фактической жесткости, определяемой рассмотренным выше способом.

Расчетная схема. Шлифовальный круг (ШК) радиусом  $R$ , вращаясь со скоростью резания  $V$  (м/с) перемещается в сторону заготовки (радиусом  $r_i$  (мм), массой  $M$  (кг), частотой вращения  $n$  (об/мин). При достижении периферии режущей кромки ШК координаты  $x_i$  (мм) производится переключение подачи шлифовального круга с холостого хода на рабочую программную подачу  $S_{рп}$  (мм/об). В процессе шлифования заготовки с начальным эксцентриситетом  $e$  радиус  $r_i$  уменьшится на величину съема материала за 1 оборот заготовки  $h$  (мм). При этом начальная координата оси заготовки  $b$  (мм) смещается за оборот заготовки в координату  $c$  (мм), на величину упругих деформаций  $\Delta Y$  (мм) в зависимости от фактической жесткости технологической системы  $I_\phi$  (Н/м) (Рис. 2).

При смещении координаты центра вращения заготовки из координаты  $b$  в  $c$  съем материала за оборот заготовки  $h$  примет вид:

$$h = (b - \Delta Y) - x_i = c + r_i - x_i. \quad (4)$$

где  $x_i$  – текущая координата периферии шлифовального круга, мм;  $i$  – номер оборота заготовки.

Для представленной расчетной схемы на основе уравнения Ньютона уравнение движения заготовки примет следующий вид:

$$M \cdot \frac{d^2 c}{d\theta^2} + \mu \cdot \frac{dc}{d\theta} + I_\phi \cdot c = -P_y. \quad (5)$$

где  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н;  $\mu$  – коэффициент линейной вязкости заготовки;  $\theta$  – время одного оборота заготовки, (с)



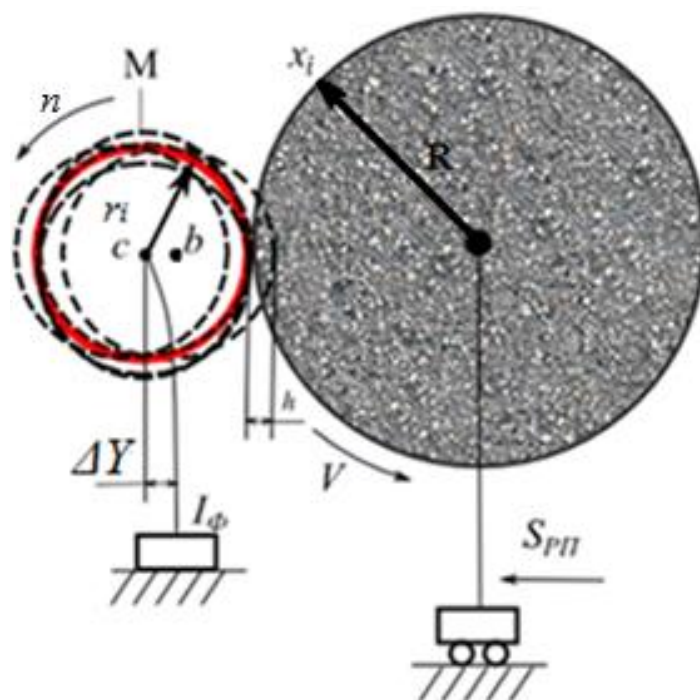


Рис. 2. Кинематическая схема силового взаимодействия шлифовального круга и заготовки в процессе круглого врезного шлифования

Количество параметров модели, характеризует трудоемкость расчета и идентификацию параметров. Поэтому, произведем переход к системе СИ и обезразмериванию параметров модели. Установим три размерно-независимых параметра: масса заготовки  $M$ , радиус детали в конце процесса шлифования  $r$ , угловая скорость детали  $w$ . Уравнение (5) примет следующий вид:

$$\frac{d^2 c'}{dt^2} + \frac{\mu' \cdot dc'}{dt} + I' \cdot c' = -P'_y. \quad (6)$$

Обозначим через  $P(t)$  фундаментальную нормированную матрицу решений системы уравнений, т.е. матрицу, столбцы которой являются решением системы уравнений (12), причем  $P(0)$  является единичной матрицей. Дискретный шаг по времени  $dt$ , выбирается при следующих условиях:

- 1)  $2\pi/dt$  является целым числом;
- 2) за промежуток времени  $dt$  сила резания  $P_y$  считается постоянной;

$$3) P_o(dt) = \int_0^{dt} P(dt - \tau) \cdot d\tau$$

В результате решения системы уравнения движения заготовки в процессе круглого врезного шлифования для каждого дискретного значения  $n \cdot dt$  получим уравнение:

$$X(n \cdot dt) = P(dt) \cdot X((n-1) \cdot dt) + P_o(dt) \cdot P_y. \quad (7)$$

На базе предложенной модели круглого врезного шлифования разработано программное обеспечение (ПО) Ext.Cyl.Grinding в среде программирования С. Программное обеспечение позволяет: моделировать процесс обработки с выходными данными в виде изменения радиуса заготовки в процессе обработке с заданным количеством итераций; производить расчет фактической подачи во время обработки с учетом упругих деформаций в технологической системе; определять основное время цикла шлифования до выполнения требований операционного эскиза; определять конечное биение детали.

Экспериментальное подтверждение результатов моделирования. Обработка деталей производилась при следующих параметрах: марки стали заготовки – сталь 40, 40Х, 40ХН; шлифовальный круг – 600 63 305 24А40Н СМ2; диаметры заготовки – 53,18; 52,8; 54 мм; ширина шлифования – 10 мм; радиальная подача – 0,25 мм/мин; время цикла – 25 с.; удаляемый припуск на сторону – 0,1 мм; количество редуций для каждой марки стали – 5; скорость резания – 50 м/с; частота вращения заготовки – 200 об/мин. Среднее значение отклонения полученных в экспериментах диаметров деталей от расчетных по модели составляет 0,032%.

### **Методика проектирования цикла круглого врезного шлифования**

В методике предлагается учитывать ряд ограничений на радиальную подачу шлифовального круга при проектировании цикла шлифования: по паспортным данным станка; по шероховатости поверхности детали; по мощности главного привода; по осыпаемости шлифовального круга; по глубине прижога на поверхности детали; по величине упругих деформаций в технологической системе. В качестве начальных параметров при проектировании цикла шлифования принимаются параметры заготовки, шлифовального круга и фактическая жесткость технологической системы. Жесткость определяется путем измерения диаметра заготовки прибором активного контроля в процессе тестирования ТС и расчета радиальной составляющей силы резания.

Построение цикла производится в системе координат «радиальная подача/припуск». Для поиска оптимального значения подач на каждой ступени цикла применяется метод направленного перебора. Для этого на систему координат накладывается сетка «радиальная подача/припуск». Вдоль оси радиальной подачи – сетка имеет равномерный шаг  $h_s$ . Количество переключений подачи  $i=1...n$ . Начальная подача для перебора задается максимальной подачей по паспорту станка. Минимальный шаг подачи определяется дискретностью привода подач конкретного станка с ЧПУ. Вдоль оси припуска – сетка имеет переменный шаг  $h_i$ , который зависит от радиальной подачи. Графическое отображение сетки «радиальная подача/припуск» представлено на Рисунке 3.

Первым рассчитывается ограничение радиальной подачи шлифовального круга по параметрам станка. Затем, рассчитывается подача, отвечающая требованиям по шероховатости поверхности детали при 1 итерации значения частоты вращения заготовки. Далее расчетное значение подачи, ограниченное шероховатостью поверхности детали, сравнивается с паспортными данными станка. В случае выполнения ограничения по шероховатости поверхности данная подача записывается как допустимая при заданной начальной частоте вращения заготовки. Если условие не выполняется – частота вращения заготовки изменяется на заданный шаг  $m$  и производится повторный расчет радиальной подачи и её сравнение с паспортными данными станка. Величина шага подачи по частоте вращений заготовки влияет на количество проектируемых циклов шлифования и характеризует производительность расчетов. При выполнении ограничения по шероховатости поверхности детали следующим проверяется ограничение по потребной мощности привода для текущей величины радиальной подачи  $S_i$ .

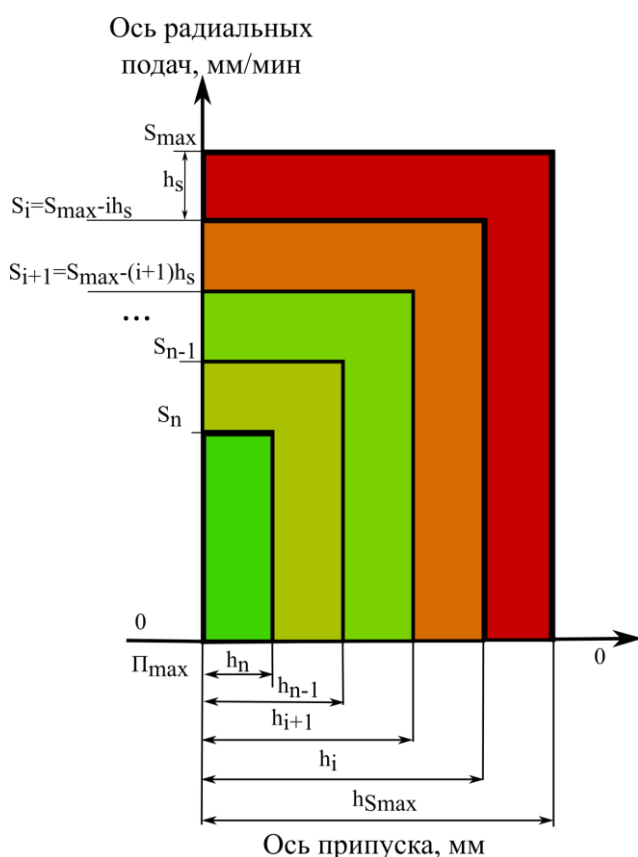


Рис. 3. Наложение сетки «подача/припуск» в области проектирования цикла круглого врезного шлифования

чение глубины прижога проверяется на возможность удаления прижога. В случае если величина ожидаемого прижога меньше оставшегося припуска  $\Pi_{ост}$  – ограничение выполняется. В случае не выполнения условий ограничения – подача уменьшается на шаг по сетке  $h_s$ . И производится повторный расчет ограничения по глубине прижога.

В случае выполнения ограничения – производится проверка текущей радиальной подачи  $S_i$  по величине упругих деформаций в технологической системе. Для этого моделируется съём припуска при заданной радиальной подаче  $S_i$ . Величина остаточного припуска  $\Pi_{ост}$  должна перекрывать величину припуска  $\Pi_i \in [0; \Pi_{ост}]$ , требуемую для снижения до подачи  $S_{Ra}$ , при которой выполняется требование по шероховатости поверхности детали. То есть проверяется возможность формирования цикла с заданной ступени, гарантированно обеспечивающего выполнение требований по шероховатости поверхности детали. В случае не выполнения условий ограничения – подача уменьшается на шаг по сетке  $h_s$ . И производится повторный расчет ограничения.

В случае выполнения ограничения – производится перемещение на шаг по сетке в координате припуска на текущей подаче  $S_i$  и повторный расчет ограничений. Данная последовательность действий по проверке ограничений производится до тех пор, пока величина остаточного припуска  $\Pi_{ост}$  не будет равна нулю. Таким образом, по разработанной методике проектирования формируется первый вариант допустимого цикла шлифования, который записывается в массив циклов при заданной частоте вращения заготовки. Затем начальная подача в сетке  $S_{max}$  уменьшается на заданный шаг  $h_s$  и производится повторный расчет ограничений

В случае не выполнения условий ограничения – подача уменьшается на шаг по сетке  $h_s$ . И производится повторный расчет ограничения по потребной мощности привода шлифовального круга.

В случае выполнения ограничения – производится расчет предельной силы по осыпаемости шлифовального круга  $P_{св}$  и главной составляющей силы резания  $P_z$  для текущей радиальной подачи  $S_i$ . Затем производится сравнение расчетных значений силы. В случае выполнения неравенства  $P_{св} \geq P_z$  – заданная подача уменьшается на шаг по сетке  $h_s$ . И производится повторный расчет ограничения по осыпаемости шлифовального круга.

В случае выполнения неравенства  $P_{св} \leq P_z$  – производится расчет температуры в зоне обработки и глубины прижога на поверхности заготовки при текущей радиальной подаче  $S_i$ . Полученное значение

для оценки допустимости данного хода. После расчета ограничений также как и в первом варианте цикла производится расчет остальных ступеней цикла шлифования. В результате  $n$ -ого количества уменьшений начальной подачи цикла и повторных расчетов формируется второй допустимый цикл шлифования, который записывается в массив циклов при заданной частоте вращения заготовки. Таким образом уменьшение начальной подачи в следующем варианте цикла производится до тех пор, пока начальная радиальная подача  $S_{\max}$  не будет равна  $S_{\min}$ , то есть будет сформирован одноступенчатый цикл шлифования при котором перемещение по оси «припуска» будет производиться на подаче, ограниченной шероховатостью поверхности детали. В результате массив циклов будет содержать  $n$ -ое множество допустимых циклов шлифования с различным количеством ступеней цикла.

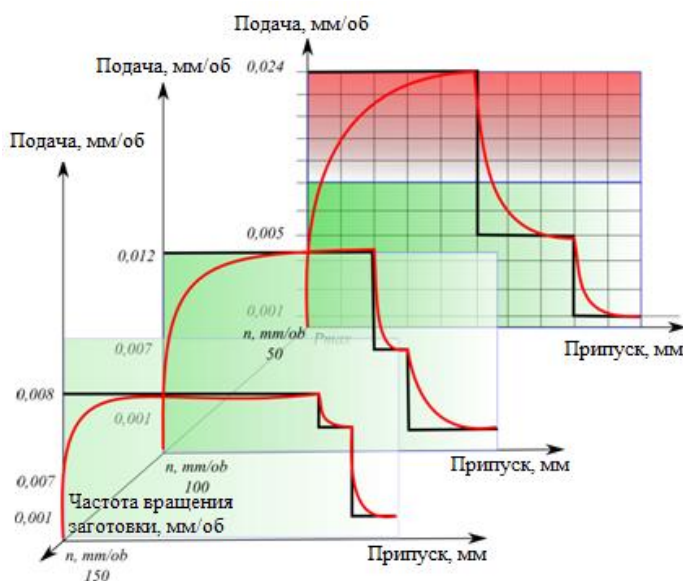


Рис. 4. Пример массива циклов шлифования при изменении частоты вращения заготовки

пор, пока проверяемый цикл не будет удовлетворять требованиям по заданной точности детали.

Для проверки возможности повышения производительности полученного цикла шлифования проектируются дополнительные массивы циклов шлифования для других частот вращения заготовки (Рис. 4.). По заданному шагу  $W$  задается изменение частоты вращения детали. В результате производится повторное проектирование и поиск наиболее производительного цикла при измененной частоте вращения заготовки, по которому также проводится проверочный расчет по точности обработки. Если требования по точности выполняются, то данный цикл также записывается как наилучший в массив циклов по измененной частоте вращения заготовки. Если требования не выполняются – данный цикл удаляется и производится проверочный расчет следующего по производительности цикла.

Последовательность действий описанная выше повторяется до выполнения требований по точности через проверочный расчет в модели. Таким образом формируется  $m$ -ое количество массивов циклов шлифования по заданным частотам вращения заготовки, где  $m$  - количество частот вращения заготовки. Из массива наилучших циклов шлифования выбирается цикл с минимальным временем обработки, который и будет оптимальным для фактической жесткости технологической системы. На основе алгоритма разработано программное обеспечение (ПО). Интерфейс представляет собой диалоговое окно ввода параметров расчета в файл

Из массива циклов выбирается вариант с наименьшим временем обработки. Этот вариант цикла шлифования проверяется по возможности обеспечения точности заданного радиуса и формы детали в разработанной модели. Если требования по допуску выполняются, то данный цикл записывается наилучшим при заданной частоте вращения детали. Если требования не выполняются – данный цикл удаляется из массива циклов и производится проверочный расчет следующего по производительности цикла. Данная последовательность повторяется до тех пор,

с расширением xls. Выходные данные формируются в виде документа с параметрами циклов, прошедших ограничения. При этом наиболее производительный цикл отмечается маркером для последующего проверочного расчета в программном обеспечении, моделирующем процесс шлифования с проверкой радиуса заготовки по точности обработки.

### Исследование влияния жесткости технологической системы на проектируемый цикл круглого врезного шлифования

Для анализа влияния жесткости ТС на выходные параметры проектируемого цикла произведен расчет для группы изделий: детали типа «кольцо» и «стакан». Обработка производилась на круглошлифовальном станке с ЧПУ 3М151Ф2. В результате расчета по разработанной методике спроектировано **615** допустимых циклов шлифования. Каждый цикл прошел ограничения по требованиям, описанным в расчетной методике проектирования цикла круглого врезного шлифования (Рис. 5.). Параметры циклов отображены в таблице 1.

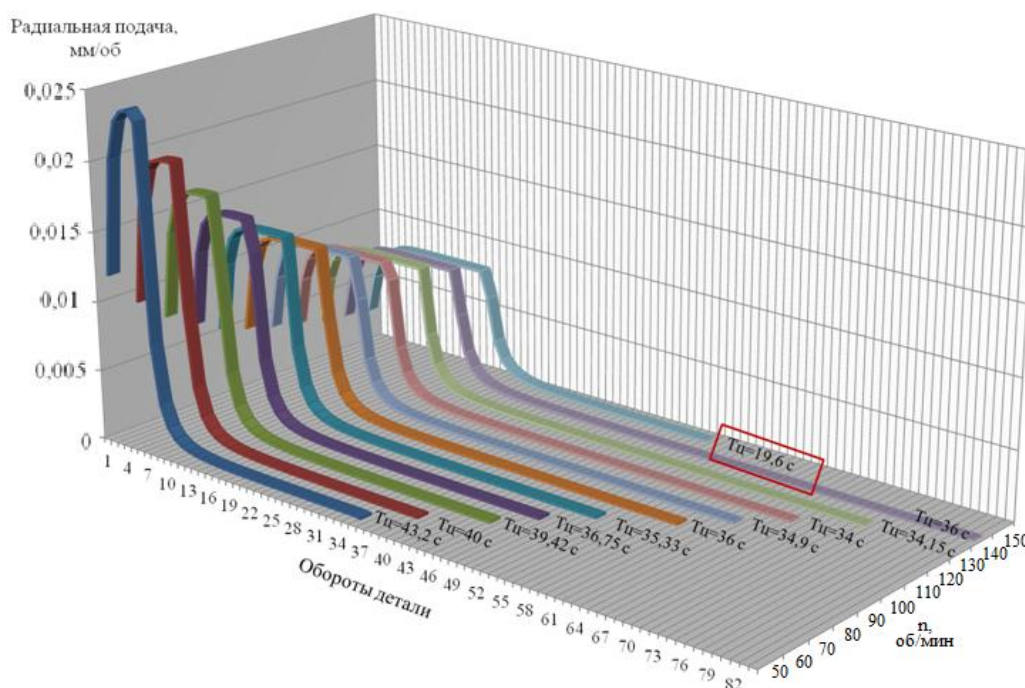


Рис. 5. Массив циклов шлифования при изменении частоты вращения заготовки с жесткостью ТС  $0,38 \cdot 10^7$  Н/м

Таблица 1.

Параметры спроектированных циклов

Параметры цикла	Детали типа «кольцо»			Детали типа «стакан»	
	Фактическая жесткость технологической системы, Н/м				
	0,38·10 <sup>7</sup>	0,28·10 <sup>7</sup>	0,21·10 <sup>7</sup>	0,12·10 <sup>7</sup>	0,08·10 <sup>7</sup>
Кол-во циклов, прошедших ограничения	148	131	112	112	112
Интервал частоты вращения заготовки, об/мин	50-150	50-130	50-110	50-100	
Минимальное время обработки, сек.	19,6 (4 ступ.)	36,5 (4 ступ.)	59,4 (3 ступ.)	192 (3 ступ.)	270,6 (3 ступ.)



По спроектированным циклам произведена обработка заготовок с последующим контролем полученных размеров.

В результате проектирования циклов круглого врезного шлифования по разработанной методике установлено:

1. В представленных расчетах для деталей типа «кольцо» с уменьшением жесткости ТС от  $0,38 \cdot 10^7$  до  $0,21 \cdot 10^7$  Н/м время цикла увеличивается в 3 раза с 19,6 с до 59,4 с. Для деталей типа «стакан» с уменьшением жесткости ТС от  $0,12 \cdot 10^7$  до  $0,08 \cdot 10^7$  Н/м время цикла увеличивается с 192 с до 270,6 с (в 1,4 раза).

2. При уменьшении жесткости ТС количество ступеней цикла шлифования уменьшается. Для деталей типа «кольцо» наиболее производительные циклы состоят из 4 ступеней переключения радиальной подачи, а для деталей типа «стакан» - из 3 ступеней переключения радиальной подачи.

3. При расчете ограничения радиальной подачи по шероховатости поверхности готовой детали формируется область в виде интервала частоты вращения заготовки, в которой выполняются требования данного ограничения. Для деталей типа «кольцо» при различной жесткости ТС интервал частоты вращения заготовки от 50 до 150 об/мин. Для детали типа «стакан» - от 50 до 100 об/мин.

### **Применение разработанной методики на производстве**

Апробация разработанной методики проектирования цикла круглого врезного шлифования произведена для деталей типа «Корпус подшипника» на предприятии АО «УПП ВЕКТОР», и деталей типа «Кольцо подшипника» на предприятии ООО «НПФ Электропривод». Разработанные рекомендации по проектированию циклов круглого врезного шлифования для станков с ЧПУ оформлены в виде руководящих технических материалов. Результаты внедрения методики проектирования циклов круглого врезного шлифования для станков с ЧПУ подтверждены актами внедрения.

Для типовой детали типа «Корпус подшипника» спроектирован цикл круглого врезного шлифования для станка Studer с ЧПУ Fanuc Oi. На основе предварительного тестирования технологической системы определен параметр фактической жесткости технологической системы  $-0,294 \cdot 10^7$  Н/м. Деталь закреплена в патроне с расточенными кулачками. Шлифуется поверхность Ø50f6. На основе методики проектирования цикла шлифования рассчитан интервал частоты вращения заготовки  $n=20...130$  об/мин, в котором выполняются требования по шероховатости поверхности детали. Массив циклов при изменении частоты вращения заготовки с изменением фактической подачи представлен на Рисунке 6. В результате проектирования цикла круглого врезного шлифования рассчитан оптимальный по производительности трех ступенчатый цикл шлифования с частотой вращения заготовки 130 об/мин, при котором производится удаление припуска с заготовки за 158,7 секунд. В действующем технологическом процессе детали типа «Корпус подшипника», отладка которого производилась, на основе подбора режимов резания путем обработки пробных заготовок производится удаление припуска за 214 секунд. Таким образом, за счет уменьшения времени обработки по циклу спроектированному на основе РТМ производительность операции круглого врезного шлифования увеличивается в 1,34 раза.

Для типовой детали типа «Кольцо подшипника» спроектирован цикл круглого врезного шлифования для станка с ЧПУ Okamoto. Определен параметр фактической жесткости технологической системы  $-0,41 \cdot 10^7$  Н/м. Деталь закреплена на оправке. Шлифуется поверхность Ø32. На основе методики проектирования цикла шлифования рассчитан интервал частоты вращения заготовки  $n=20...180$  об/мин, в

котором выполняются требования по шероховатости поверхности детали. Массив циклов при изменении частоты вращения заготовки с изменением фактической подачи представлен на Рисунке 7.

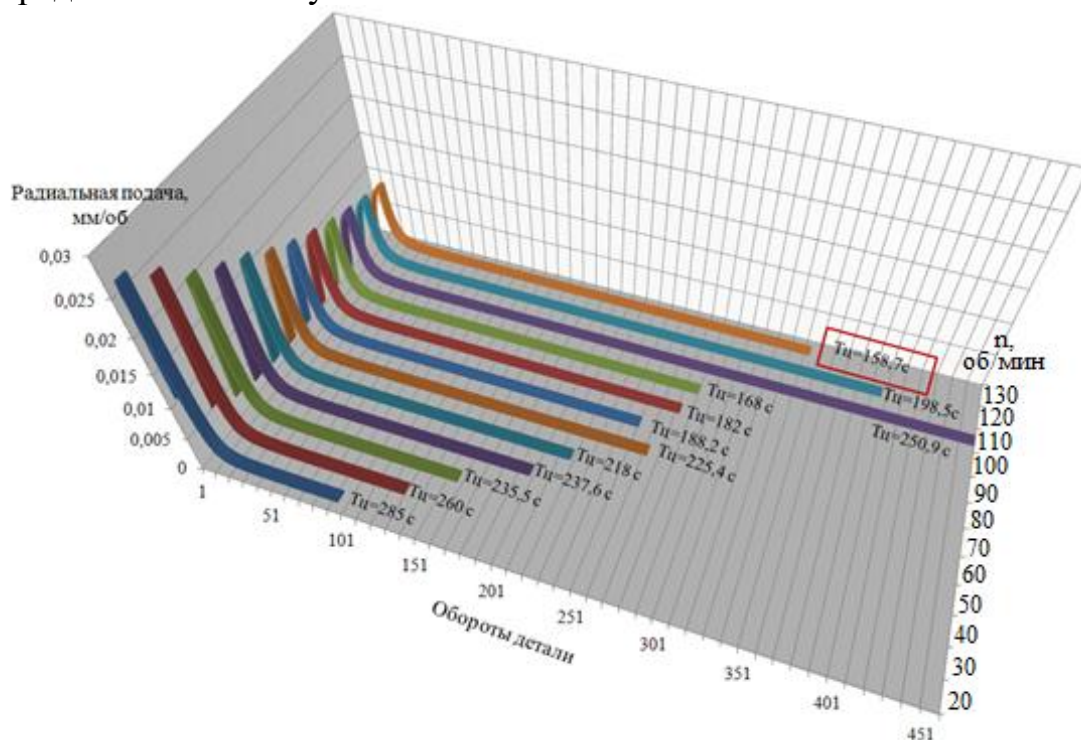


Рис. 6. Массив наилучших циклов для детали типа «Корпус подшипника»

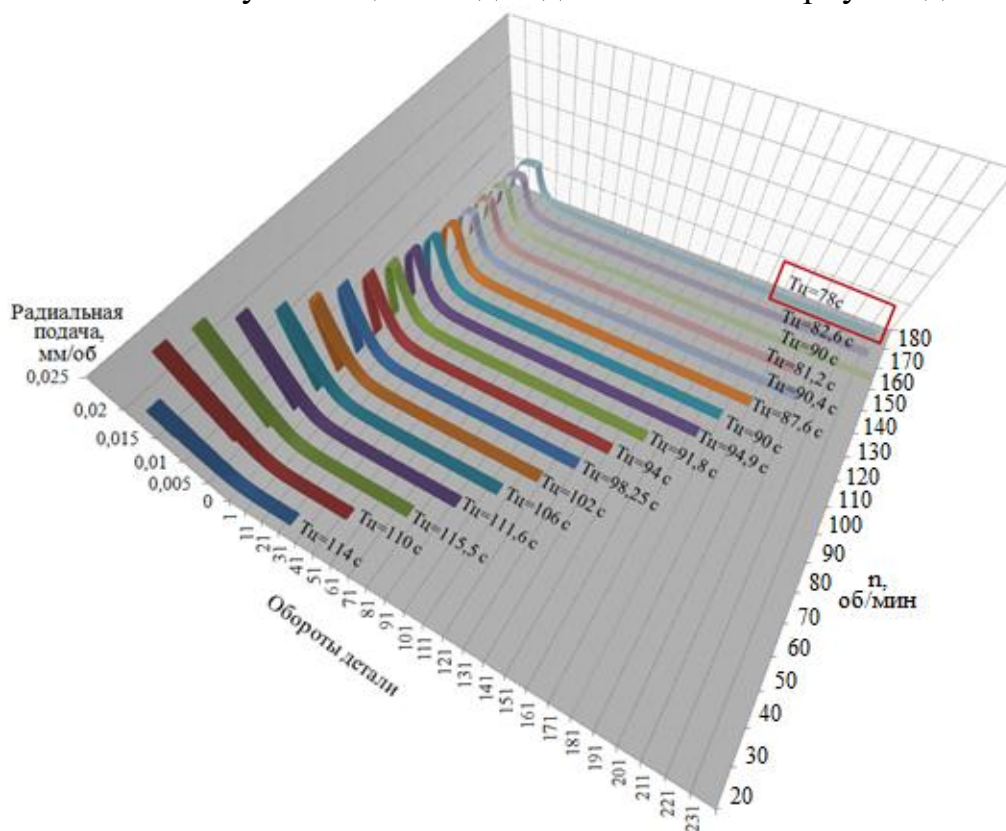


Рис. 7. Массив циклов шлифования детали типа «Кольцо подшипника»

В результате проектирования цикла круглого врезного шлифования при фактической жесткости  $TC\ 0,41 \cdot 10^7\ Н/м$  рассчитан оптимальный по производитель-

ности трех ступенчатый цикл шлифования с частотой вращения заготовки 180, при котором производится удаление припуска с заготовки за 78 секунд. В действующем технологическом процессе детали типа «Кольцо подшипника», отладка которого производилась, на основе обработки пробных заготовок производится удаление припуска за 90 секунд. Таким образом, за счет уменьшения времени обработки, по циклу спроектированного на основе РТМ производительность операции круглого врезного шлифования увеличивается в 1,15 раза.

### **Контроль шероховатости поверхности обработанных деталей**

По результатам обработки тестовых деталей была произведена проверка шероховатости поверхности на профилометре модель 130. Базовая значение составляет  $Ra=0,4$  мкм. Результаты представлены в таблице 2. В результате 5 редуций измерений, обротанных по спроектированному циклу деталей, получено среднее значение шероховатости  $Ra$ : для «Корпус подшипника» - 0,381 мкм; «Кольцо подшипника» - 0,369 мкм.

Таблица 2.

Результаты измерения шероховатости обработанной поверхности

Наименование детали									
Корпус подшипника					Кольцо подшипника				
Номер редуции									
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Измеренная шероховатость, Ra, мкм									
0,355	0,377	0,416	0,389	0,368	0,504	0,402	0,307	0,307	0,327

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

### **Результаты:**

1. Разработан способ определения фактической жесткости технологической системы на основе предварительного тестирования. Получен патент на изобретение РФ № 2014124405 с приоритетом от 16.06.2014 «Способ определения жесткости технологической системы круглошлифовального станка с ЧПУ», авторы Гузев В.И., Нуркенов А.Х., заявитель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

2. Разработано программное обеспечение на основе кинематической модели силового взаимодействия шлифовального круга и заготовки, которое позволяет моделировать циклы круглого врезного шлифования с учетом фактической жесткости технологической системы. Минимизация параметров модели на основе обезразмеривания позволяет сократить время на проектирование операции шлифование и обеспечивает применяемость разработанного ПО на аппаратуре системы ЧПУ.

3. Разработана методика проектирования цикла круглого врезного шлифования для станков с ЧПУ на основе тестирования технологической системы. На основе методики разработан и внедрен руководящий технический материал (РТМ) «Проектирование циклов круглого врезного шлифования на станках с ЧПУ с уче-



том фактической жесткости технологической системы» на предприятиях машиностроительной отрасли.

4. Доказана эффективность разработанной методики «Проектирование циклов круглого врезного шлифования на станках с ЧПУ с учетом фактической жесткости технологической системы» на основе её применения в действующем производстве. Спроектированы циклы для изготовления деталей корпус и кольцо подшипника, повышающие производительность в 1,15...1,34 раза по сравнению с действующим технологическим процессом.

#### **Выводы:**

1. Оптимальное количество ступеней цикла шлифования зависит от жесткости ТС. Установлено, что для жесткости ТС в интервале от  $0,28 \cdot 10^7$  до  $0,38 \cdot 10^7$  Н/м – оптимальное количество ступеней цикла 4; для жесткости ТС в интервале от  $0,08 \cdot 10^7$  до  $0,21 \cdot 10^7$  Н/м – оптимальное количество ступеней цикла 3.

2. Установлено, что для поиска оптимального времени цикла шлифования необходимо учитывать интервал частот вращения заготовки для двухуровневой оптимизации при проектировании цикла круглого врезного шлифования.

3. Установлено влияние жесткости ТС на основное время обработки. При изменении жесткости технологической системы группы деталей с  $0,08 \cdot 10^7$  до  $0,38 \cdot 10^7$  Н/м основное время спроектированного цикла шлифования уменьшается в 3,65 раза с 285 до 78 секунд.

#### **СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Гузеев В.И., Нуркенов А.Х. Методика проектирования цикла врезного шлифования на основе тестового определения жесткости технологической системы // СТИН. 2014. №8. С. 31–35. (0,44 п.л. / 0,22 п.л.)

2. Гузеев В.И., Нуркенов А.Х., Игнатова А.В. Экспериментальное определение жесткости узлов технологической системы при круглом врезном шлифовании на станке с ЧПУ // СТИН. 2014. №7. С. 26–29. (0,44 п.л. / 0,15 п.л.)

3. Гузеев В.И., Нуркенов А.Х., Геренштейн А.В. Научноёмкий процесс моделирования цикла врезного шлифования цилиндрических заготовок // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2013. №10. С. 9–12. (0,39 п.л. / 0,13 п.л.)

4. Нуркенов А.Х. Повышение эффективности процесса шлифования на станке с ЧПУ NaXos PMD 320 на основе ограничений комплексной модели управления циклом шлифования // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 3-3 (293). С. 151–157. (0,39 п.л.)

5. Гузеев В.И., Кошин А.А., Нуркенов А.Х. Разработка алгоритма оценки надежности блока управления прибора активного контроля // Челябинск: Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2012. Выпуск 23. С. 38–42. (0,39 п.л. / 0,13 п.л.)

6. Способ определения жесткости технологической системы круглошлифовального станка с ЧПУ: патент на изобретение РФ: № 2568553 РФ / Гузеев В.И., Нуркенов А.Х.; заявл. 16.06.2014; опубл. 19.11.2015. Заяв. №2014124405. (0,28 п.л. / 0,14 п.л.)

7. Guzeev V.I., Nurkenov A. Kh. Designing the plunge-grinding cycle on the basis of the rigidity of the technological system // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35. No. 2. P. 150–153. (0,22 п.л. / 0,11 п.л.)

8. Guzeev V.I., Nurkenov A. Kh., Ignatova A. V. Research stiffness of CNC plunge grinding machine units // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35. No. 1. P. 69–72. (0,22 п.л. / 0,10 п.л.)

9. Нуркенов А.Х., Геренштейн А.В., Машрабов Н.М. Методика моделирования круглого врезного шлифования с учетом фактической жесткости технологической системы // Материалы LIV международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». Челябинск: ЧГАА. 2015. Часть 3. С. 92–98. (0,28 п.л. / 0,14 п.л.)
10. Нуркенов А.Х., Гузеев В.И. Анализ операции круглого врезного шлифования на станке с ЧПУ // Будущее машиностроения России 2013: Сб. тез. М.:МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. С.57–58. (0,11 п.л. / 0,055 п.л.)
11. Гузеев В.И., Нуркенов, А.Х. Проектирование циклов врезного шлифования на основе динамической жесткости технологической системы // Будущее машиностроения России 2014: Сб. тез. М.:МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. С. 29–30. (0,11 п.л. / 0,055 п.л.)
12. Нуркенов А.Х. Производственный метод оценки жесткости технологической системы шлифовального станка // материалы 66-й научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, соискателей и магистрантов в ЮУрГУ. Технические науки. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2014. С. 460–463. (0,17 п.л.)
13. Кошин А.А., Нуркенов А.Х. Автоматизированная система управления циклом шлифования с обратной адаптивной связью через прибор активного контроля // VIII Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании»: сб. науч. тр. Днепропетровск-Варна. 2012. С. 96–97. (0,11 п.л. / 0,055 п.л.)
14. Кошин А.А., Нуркенов А.Х. Проектирование интеллектуальных циклов шлифования для станков с ЧПУ // 7 международная конференция «Информационные технологии в промышленности» : Сб. науч. тр. Минск, 2012. С. 161–162. (0,11 п.л. / 0,055 п.л.)
15. Нуркенов А.Х. Разработка алгоритма управления циклом шлифования для станка с ЧПУ NAXOS PMD 320 // материалы XI Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Механики XXI века». Братск, 2012. С. 205–212. (0,4 п.л.)
16. Нуркенов А.Х., Савельев А.А. Экспериментальная оценка параметров эквивалентной упругой системы станка 3М151Ф2 на портативном // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. С. 55–59. (0,17 п.л. / 0,1 п.л.)
17. Кошин А.А., Нуркенов А.Х. Контроль надежности и точности обработки круглого шлифования на базе последовательного анализа // Будущее машиностроения России 2011: Сб. тез. М.:МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. С. 38–41. (0,11 п.л. / 0,055 п.л.)
18. Нуркенов А.Х. Статистический анализ технологических процессов // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. С. 96–98. (0,11 п.л.)