

На правах рукописи



АЛЬСИГАР МАСАР КАДИМ

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО
ШЛИФОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ ПУТЁМ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛОВ
РАДИАЛЬНОЙ И ОСЕВОЙ ПОДАЧ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национально-исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
ПЕРЕВЕРЗЕВ ПАВЕЛ ПЕТРОВИЧ

Официальные оппоненты: **БРАТАН СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», заведующий кафедрой «Технология машиностроения»;

НОСЕНКО ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.186.03 в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» и на сайте: https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/alsigar

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воячек Игорь Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Операции круглого наружного шлифования с осевой подачей (КШОП), выполняемые на станках с ЧПУ, получили широкое распространение в машиностроении (до 30% от общего объема всех шлифовальных работ).

В рамках машиностроительной отрасли ежемесячно проектируются тысячи управляющих программ (УП) для операций круглого шлифования с ЧПУ, на которых за один установ обрабатываются несколько разных поверхностей детали. Поэтому полная автоматизация технологической подготовки производства (ТПП) на этом этапе является актуальной. Однако автоматизированное проектирование УП прерывается на этапе ручного ввода технологом параметров автоматических ступенчатых циклов, в частности, радиальной и осевой подач. К параметрам цикла подачи относятся: количество ступеней, подача на каждой ступени и снимаемая часть припуска на каждой ступени. В существующих САМ-системах круглошлифовальных операций с ЧПУ рассчитываются только траектории перемещения круга без расчета оптимальных режимов резания, обеспечивающих требуемую точность обрабатываемой поверхности. Полная автоматизация ТПП подготовки УП при таком подходе невозможна. Параметры циклов радиальной и осевой подач технолог назначает на основе своего опыта в условиях отсутствия нормативов режимов резания для операций круглого наружного шлифования с ЧПУ. Технолог вынужден занижать параметры циклов подач, чтобы гарантированно обеспечить качество обрабатываемых поверхностей, что приводит к снижению производительности обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ. Поэтому создание методики расчета оптимальных циклов подач для САМ-систем является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Многие ученые, такие, как Л.В. Худобин, С.М. Братан, С.Н. Корчак, В.Н. Михелькевич, П.П. Переверзев, В.Л. Кулыгин, А.В. Акинцева, S. Malkin, W. Pereira, A. Diniz занимались вопросом повышения производительности в автоматических циклах шлифования. В работах А.В. Акинцевой предложен научный подход к расчету глубины резания и погрешности обработки при совместном управлении циклами радиальной и осевой подач. Но все ее работы относятся только к операциям внутреннего шлифования с ЧПУ и погрешность обработки рассчитывается только в реверсной зоне.

В реверсных зонах, в которых происходит дополнительный съем металла при врезании и реверсных остановках круга, погрешность обработки не определяется. Важной особенностью процесса КШОП с ЧПУ является то, что точность диаметрального размера контролируется только в одном сечении вала, в котором установлен прибор активного контроля. В остальных сечениях точность не контролируется и размер диаметра может выйти за допустимые пределы. Следовательно, для обеспечения заданной точности обработки по всей длине вала, необходимо отдельно вести

расчет погрешности обработки в реверсных и нереверсной зонах, в которых припуск снимается при разных режимах обработки из-за наличия этапов врезания и реверсных остановок в конце каждого хода стола.

В данной диссертации впервые предложена методика проектирования оптимальных циклов радиальной и осевой подач при круглом наружном шлифовании с отдельным учетом ограничений подач по точности обработки в реверсных и нереверсной зоне, что позволяет повысить производительность и является весьма актуальным.

Объект исследования – операция круглого наружного шлифования, выполняемая на станке с ЧПУ.

Предмет исследования – взаимосвязь между технологическими параметрами процесса круглого наружного шлифования заготовки на станке с ЧПУ и достигаемой точностью с целью повышения производительности обработки.

Целью исследования является повышение производительности операции круглого наружного шлифования с осевой подачей путем уменьшения основного времени за счёт научно-обоснованной оптимизации радиальной и осевой подач при реализации цикла обработки на станке с ЧПУ. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Дать детализированное описание этапов круглого наружного шлифования заготовки и выявить различие в механизмах съема припуска в разных зонах обработки.

2. Разработать модели съема припуска и методики определения оптимальных подач в различных зонах обработки с учетом чередования переходов, выполняемых с радиальной и осевой подачами, путем установления математической взаимосвязи между режимами, кинематическими особенностями процесса круглого наружного шлифования и достигаемой точностью обработки, а также другими показателями качества.

3. Разработать модели для определения текущих значений радиусов обрабатываемой поверхности и погрешности обработки в различных зонах и для заданных условий шлифования при совместном управлении радиальной и осевой подачами.

4. Разработать методику проектирования циклов круглого наружного шлифования на станках с ЧПУ с назначением оптимальных радиальной и осевой подач и обеспечением заданной точности при переменных условиях обработки.

5. Провести экспериментальные исследования и выполнить экспериментальную проверку адекватности разработанных моделей и методики проектирования циклов процесса круглого наружного шлифования на станках с ЧПУ.

6. Апробировать результаты выполненных исследований в условиях реального производства.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены с использованием научных основ технологии машиностроения, теории

резания, теории автоматического управления и автоматизации технологических процессов. Экспериментальные исследования проведены в производственных условиях с применением стандартных методик и статистических методов обработки экспериментальных данных.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Разработаны модели съема припуска и методики определения оптимальных подач на операции круглого наружного шлифования с осевой подачей, в которых учитывается, что в реверсных зонах обработки, кроме процесса шлифования с осевой подачей, дополнительно происходит процесс круглого шлифования с радиальной подачей на этапах остановки шлифовального круга в конце каждого хода стола станка и врезания круга в начале каждого двойного хода.

2. Установлены взаимосвязи между выявленными кинематическими особенностями процесса круглого наружного шлифования, его режимами и достигаемой точностью обработки, а также другими показателями качества, с учётом колебания припуска, исходного радиального биения заготовки, затупления режущих зерен, позволяющие оптимизировать цикл обработки.

3. Разработаны модели и методики для определения текущих значений радиусов обрабатываемой поверхности и погрешности (точности) обработки в различных зонах и для заданных условий шлифования при совместном управлении радиальной и осевой подачами.

Практическая значимость результатов исследования:

1. Автоматизирован этап расчета оптимальных циклов радиальной и осевой подач при разработке управляющей программы для операции КШОП с учетом особенностей шлифования в реверсных и нереверсной зонах при переменных условиях обработки партии деталей, что позволяет повысить производительность и обеспечить заданную точность обработки.

2. Разработан программный продукт в среде C++ для прогнозирования погрешности обработки партии деталей на операции КШОП.

Соответствие паспорту специальности. Данная работа соответствует 2, 3, 5 пунктам паспорта специальности 05.02.08 «Технология машиностроения».

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель процесса съема припуска, которая позволяет определять текущее значение глубины резания отдельно во всех зонах обработки, на каждом двойном ходе стола с учетом чередования разных видов шлифования на этапах врезания и реверсных остановок, а также оптимальные значения радиальной и осевой подач в течение всего времени съема припуска, для заданных условий шлифования.

2. Результаты исследования взаимосвязей между выявленными кинематическими особенностями процесса круглого наружного шлифования, его режимами и достигаемой точностью обработки, а также другими показателями качества, с учётом колебания припуска, исходного радиального биения заготовки, затупления режущих зерен.

3. Модели и методики для определения текущих значений радиусов обрабатываемой поверхности и погрешности (точности) обработки в различных зонах и для заданных условий шлифования при совместном управлении радиальной и осевой подачами.

4. Методика оптимизации радиальной и осевой подач, в которой ограничение целевой функции по точности обработки проверяется раздельно в различных зонах обработки.

Достоверность научных результатов. Достоверность научных положений, теоретических и практических результатов обеспечивается строгостью постановки задач при построении математических моделей, обоснованностью принятых допущений, использованием математически корректных методов. Адекватность полученных результатов подтверждена экспериментальной проверкой и результатами внедрения в производство.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены на предприятии АО «Усть-Катавский вагоностроительный завод имени С.М. Кирова» (г.Усть-Катав, Челябинская область), что позволило повысить производительность операций в среднем на 18% по сравнению с действующими на предприятии технологическими процессами, а также в учебный процесс ФГАОУ «Южно-Уральский государственный университет» (г. Челябинск).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на следующих научных конференциях: Материалы научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2017 – 2020); Всероссийская конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, соискателей и магистрантов ЮУрГУ (Челябинск, 2017 – 2018); Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2017); Международная наудотехническая конференция «Пром-Инжиниринг ICIE» (Челябинск, Москва, 2017-2020); Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении ISMTMTE» (Севастополь, 2018-2020); Международная научно-практическая конференция «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (Санкт-Петербург, 2018 – 2020); IX Международная научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (Барнаул, 2018); Международная научная конференция «Управление процессами и научные разработки» (Великобритания, 2020).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 26 печатные работы, в том числе 5 статей в изданиях из перечня ВАК, 12 статей в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, 5 приложений, списка литературы из 148 наименований, Работа изложена на 160 страницах машинописного текста, включая 34 рисунка и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы исследований, произведена оценка степени разработанности темы исследования, поставлены цель и задачи проводимых исследований, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены методология и методы исследований, перечислены основные положения, выносимые на защиту, дана оценка степени достоверности проведенных исследований, представлена апробация полученных результатов.

В первой главе на основе исследования российских и зарубежных ученых рассмотрены пути повышения качества обработки и вопрос управления в автоматических циклах с осевой подачей, выполняемые на станках с ЧПУ.

Большинство научных работ содержат частные рекомендации, а также математические модели съема металла, расчетные методики проектирования циклов, которые имеют ряд следующих существенных недостатков. Во-первых, в технологии машиностроения многие задачи проектирования, в том числе и задачи расчета оптимальных циклов радиальной и осевой подач для круглошлифовальных станков с ЧПУ, до сих пор не имеют достаточно полного и надежного математического описания из-за отсутствия соответствующих методик анализа, а также отсутствие модели съема металла при совместном управлении двумя подачами. Во-вторых, в современном машиностроении до сих пор отсутствуют, как виртуальные среды, так и технологии цифрового проектирования управляющих программ для круглошлифовальных станков с ЧПУ, включающие расчет оптимальных циклов совместного управления радиальной и осевой подачами с учетом технологических ограничений и нестабильных условий шлифования партии деталей для операций КШОП. В-третьих, отсутствуют модели расчета текущих значений радиусов обрабатываемой поверхности за один двойной ход и для всего цикла шлифования в реверсных и нереверсных зонах обрабатываемой поверхности вала. В-четвёртых, в принципе отсутствует модель и методика прогнозирования точности обработки по всей длине обрабатываемой поверхности на операциях КШОП с совместным управлением двумя автоматическими циклами радиальной и осевой подач, для заданных условий шлифования и действия переменных технологических по всей длине обработки. В-пятых, отсутствует методика совместной оптимизации радиальной и осевой подач для КШОП, в которой ограничение целевой функции по точности обработки проверяется отдельно в реверсных (РЗ1 и РЗ2) и нереверсной (НЗ) зонах.

Вторая глава посвящена разработке модели расчета текущих значений фактических подач в цикле КШОП, с учетом особенной процесса шлифования в реверсных РЗ1 и РЗ2 и нереверсной НЗ зонах по длине обрабатываемой поверхности заготовки (рис. 1А и В).

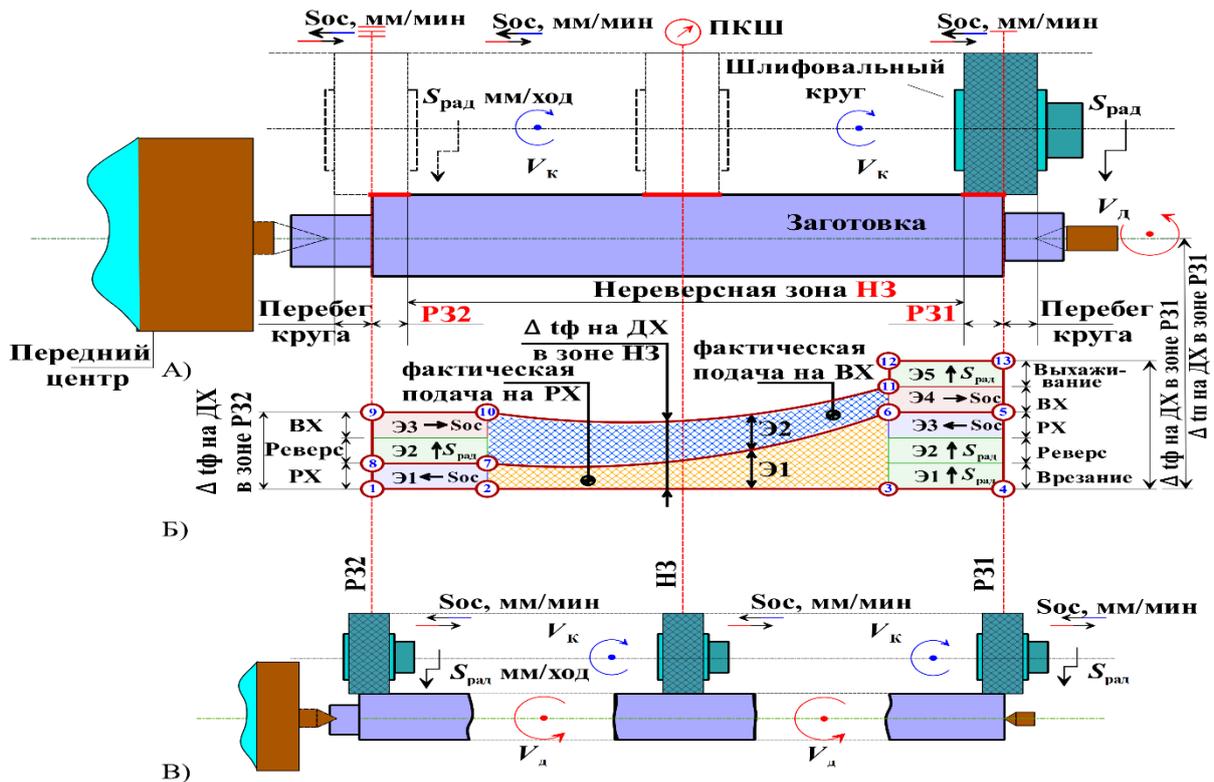


Рисунок 1 – Слои снимаемого металла в реверсных и нереверсных зонах за один двойной ход на обрабатываемой поверхности заготовки при КШОП (А); этапы обработки и слои снимаемого металла во всех зонах (Б); зоны обрабатываемой поверхности при КШОП (В)

В реверсных зонах Р31 и Р32, в конце каждого хода стола, происходит кратковременная остановка стола станка для реверса осевой подачи, при которой шлифовальный круг выходит из зоны контакта на величину заданного перебега. Длина реверсной зоны равна разнице между высотой круга и его заданным перебегом. С целью учета особенностей кинематики процесса КШОП, обрабатываемая поверхность заготовки разделена на три зоны (рис.1А и В): реверсная зона Р31 расположена у входного торца, и реверсная зона Р32 у выходного торца. Нереверсная зона НЗ расположена между зонами Р31 и Р32. Важной особенностью процесса КШОП является то, что в зонах Р31 и Р32 происходит дополнительный сьем припуска за время двойного хода по сравнению с зоной НЗ. За время остановок стола при реверсе осевой подачи сьем припуска в зонах Р31 и Р32 ведется не только при круглом шлифовании с осевой подачей, но и при круглом шлифовании с радиальной подачей (КШРП). За короткое время реверса в зонах Р31 и Р32 производится дополнительный сьем металла за счет остаточных упругих деформаций в ТС при выхаживании в процессе КШРП. Кроме того, в зоне Р31 осуществляется дополнительный сьем металла еще и при врезании круга в заготовку перед каждым двойным ходом на величину радиальной подачи на двойной ход (ДХ). Эти процессы дополнительного съема металла в зоне НЗ отсутствуют. Для систематизации различий процесса шлифования во всех зонах обрабатываемой поверхности, в зонах Р31, Р32 и НЗ процесс шлифования разделен на этапы. Установлено, что в реверсных зонах

операции КШОП сьем металла происходит за несколько этапов с чередованием разных видов шлифования при КШОП и КШРП (табл. 1).

Таблица 1 – Сценарии и этапы процесса съема металла в реверсных и нереверсной зонах при круглом шлифовании с осевой подачей

Зоны обработки	Вид подачи	Этапы процесса шлифования				
		Врезание	Реверс	РХ	ВХ	Реверс
Р31	КШРП	Радиальная минутная подача, мм/мин				
		Э1	Э2	Х	Х	Э5
	КШОП	Осевая минутная подача, мм/мин				
		Х	Х	Э3	Э4	Х
НЗ	КШОП	Осевая минутная подача, мм/мин				
		Х	Х	Э1	Э2	Х
Р32	КШРП	Радиальная минутная подача, мм/мин				
		Х	Э2	Х	Х	Х
	КШОП	Осевая минутная подача, мм/мин				
		Х	Х	Э1	Э3	Х

Цикл шлифования в зоне Р31 за время ДХ, состоит из пяти этапов. Соответственно цикл шлифования в зоне НЗ состоит из двух этапов, а в зоне Р32 – из трех этапов. В зоне Р31 этап Э1 ведется в режиме КШРП с программной радиальной минутной подачей $S_{\text{рад}}$.

Шлифовальная бабка круга подается на величину программной подачи на двойной ход, равной заданной в цикле глубине резания на ДХ. Этап Э2 тоже ведется в режиме круглого врезного шлифования за время реверсной остановки, но, как этап выхаживания при программной радиальной подаче равной нулю.

На этом этапе Э2 в зоне Р31 происходит программная остановка движения круга с радиальной подачей и включение осевой подачи $S_{\text{ос}}$. Этапы Э3 и Э4 ведутся при круглом шлифовании с осевой подачей КШОП, когда шлифовальный круг уже заглубился на величину радиальной программной подачи на двойной ход. На этом этапе включается осевая подача и начинается рабочий ход (РХ), Этап Э4 тоже ведется в режиме КШОП при обратном выхаживающем ходе (ВХ). Этап Э5 опять ведется при реверсе осевой подачи путем круглого врезного шлифования с этапом выхаживания при программной радиальной подаче равной нулю за счет оставшегося натяга. В зоне НЗ выделено два этапа Э1 и Э2, которые проходят в режиме КШОП.

Цикл шлифования в зоне Р32 состоит из трех этапов, соответственно обозначенные Э1, Э2 и Э3. Этап Э1 ведется в конце РХ при КШОП. На этапе Э2 происходит реверс осевой подачи круга. Круг останавливается на время реверса, но шлифование продолжается, но уже в режиме круглого врезного шлифования с выхаживанием, при радиальной подаче равной нулю. После реверса начинается ВХ на этапе Э3 в режиме КШОП. Съем металла производится за счет натяга в ТС, созданного при врезании круга в зоне Р31. Причем в реверсных зонах Р31 и Р32 шлифование ведется при неполном контакте круга с заготовкой из-за наличия перебега круга, который может быть различным. На рис.1Б показаны слои металла,

снимаемые с обрабатываемой поверхности за один двойной ход во всех трех зонах и на разных этапах.

Слой металла, снимаемые за время шлифования на РХ и ВХ, соответственно обозначены на рис.1Б областями 1-2-3-4-5-6-7-8 и 8-9-10-11-12-13-5-6-7-8. Слой металла снимаемый в зоне РЗ1 обозначен, как 3-4-5-13-12-11-6, а в зоне РЗ2 – 1-2-7-10-9-8. Остальной слой снимается в зоне НЗ. Следовательно, из-за наличия процесса врезания круга перед каждым ДХ, а также наличия процессов кратковременной остановки круга для реверса осевой подачи, в реверсных зонах РЗ1 и РЗ2 съём металла ведется путем чередования разных видов шлифования в следующих последовательностях (табл. 1 и рис. 1): в зоне РЗ1 чередуются виды шлифования КШРП (этапы Э1 и Э2), затем КШОП (этапы Э3 и Э4) и КШРП (этап Э5); в зоне РЗ2 чередуются виды шлифования КШОП (этап Э1), затем КШРП (этап Э2) и КШОП (этап Э3). В зоне НЗ шлифование на этапах Э1 и Э2 ведется при одном виде шлифования КШОП. Таким образом, в реверсных зонах РЗ1 и РЗ2 происходит дополнительный съём металла по сравнению с зоной НЗ. Причем в зоне РЗ1 дополнительный съём металла гораздо больший по сравнению с зоной РЗ2 из-за наличия этапа врезания перед каждым двойным ходом. В результате съём металла в зонах РЗ1, РЗ2 и НЗ ведется по существенно различным сценариям шлифования и режимам резания. Наличие перебега круга и многоэтапности обработки в зонах реверса осевой подачи на обрабатываемой поверхности заготовки, а также чередование разных видов шлифования в реверсных зонах при различной податливости ТС во всех зонах, приводят к значительным колебаниям силы резания и величины снятого припуска по длине обрабатываемой поверхности вала, резкой смене видов подач и геометрии зоны контакта и параметров, что обуславливает различную погрешность размеров поверхности вала в разных зонах обработки.

Поэтому для моделирования процесса съема металла и расчета погрешности обработки необходимы две разные модели расчета силы резания и фактической подачи, а именно для процессов круглого наружного шлифования с радиальной и осевой подачей. Причем обе модели должны быть построены исходя из единой модели физики процесса резания при шлифовании и быть совместимыми по параметрам, чтобы была возможность передачи расчетных данных процесса шлифования при моделировании чередования разных видов шлифования в реверсных зонах. В качестве единой модели принята теоретическая модель процесса резания единичным зерном, полученная С.Н. Корчаком, которая носит фундаментальный характер, т.к. она не привязана к какому-либо виду шлифования. Модель силы резания единичным зерном получена из равенства работ действующих сил резания и сил сопротивления обрабатываемого металла пластической деформации, исходя из допущений при шлифовании, вытекающих из специфики процесса среза металла режущей кромкой абразивного зерна круга. Эта модель состоит из двух слагаемых. В первом слагаемом рассчитывается сила резания, возникающая при пластической деформации металла в зоне сдвига при

резании абсолютно острым единичным зерном. Второе слагаемое учитывает увеличение силы резания, которую необходимо приложить для внедрения затупленного зерна в металл, при наличии площадки затупления на задней поверхности единичного зерна круга.

На основе модели С.Н. Корчака, в диссертационных работах П.П. Переверзева и В.Л. Кулыгина разработаны модели силы резания (1) и (2) при шлифовании кругом в целом, соответственно, для видов шлифования КШРП и КШОП:

$$P_y^{КШРП} = \frac{\pi d B \Delta t \phi n}{V_k} \sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta + \sigma_i \eta \frac{B L}{3}, \quad (1)$$

где $P_y^{КШРП}$ – радиальная составляющая силы резания при КШРП в реверсных зонах РЗ1 и РЗ2, Н; σ_i – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм²; η – степень затупления круга; B – ширина шлифования, мм; L – длина зоны контакта, мм; d – диаметр заготовки, мм; n – частота вращения заготовки, об/мин; V_k – окружная скорость вращения круга, мм/мин; ε_i – интенсивность степени деформаций металла в зоне сдвига; β – угол между вектором скорости зерна и равнодействующей сил резания.

$$P_y^{КШОП} = \pi d \Delta t \phi_i \operatorname{Soc} \frac{\sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta}{V_p} + \frac{\eta \sigma_i}{3} \frac{\operatorname{Soc}}{n} L, \quad (2)$$

где $P_y^{КШОП}$ – радиальная составляющая силы резания при КШОП в реверсных зонах НЗ, Н; $\Delta t \phi_i$ – скорость фактической поперечной подачи, мм/ход; Soc – скорость осевой подачи стола, мм/мин; V_p – скорость резания, мм/мин;

Модели (1) и (2) имеют одинаковую структуру, в соответствии с основополагающей моделью С.Н. Корчака, и тоже состоят из двух слагаемых. Первое слагаемое рассчитывает силу резания, если бы все зерна круга были абсолютно острыми и сила резания возникала бы только от сдвига металла в зоне деформации при резании. Второе слагаемое учитывает величину площадок затупления всех зерен круга, находящихся в данный момент времени в зоне контакта круга с заготовкой. Эти модели взяты за основу для расчета сил резания при чередовании разных видов шлифования в реверсных зонах, т.к. они проверены экспериментально и защищены в диссертациях.

На основе моделей (1) и (2) установлена взаимосвязь фактической и программной подач с податливостью технологической системы (ТС), выраженная в виде моделей (3) и (4), соответственно, для КШРП и КШОП:

$$\Delta t \phi_{k,i,m,z}^{КШРП} = \left[\frac{-K_4 \gamma}{2(K_3 \gamma + 1)} + \sqrt{\left(\frac{K_4 \gamma}{2(K_3 \gamma + 1)} \right)^2 + \left(\frac{t\Pi - \Delta t \phi_{k,i,m,z} - \Delta R_{k,z,m}}{K_3 \gamma + 1} \right)^2} \right]^2, \quad (3)$$

$$\Delta t \phi_{k,i,m,z}^{КШОП} = \left[\sqrt{\frac{t\Pi_{k,i,m,z} - R_{3AG^{\max}} - R_{k,i-1,m,z}}{K_1 \gamma + 1} + \left(\frac{K_2 \gamma}{2(K_1 \gamma + 1)} \right)^2} - \frac{K_2 \gamma}{2(K_1 \gamma + 1)} + \right]^2, \quad (4)$$

где $\Delta t \phi_{k,i,m,z}^{КШРП}$, $\Delta t \phi_{k,i,m,z}^{КШОП}$ – фактическая подача, соответственно, при КШРП и КШОП в зоне РЗ1, РЗ2 и НЗ, мм; k – номер радиуса заготовки; m – номер

оборота заготовки в зоне РЗ1 и РЗ2 при КШРП, z – номер ступени цикла; i – номер хода стола станка (зависит от структуры цикла при КШОП); $tП$ – программная подачи, соответственно в зонах РЗ1, НЗ и РЗ2, мм; γ – податливость технологической системы, мм/Н; R_{3AI}^{max} – максимальный радиус заготовки, мм; $R_{k,z,m-1}$ – величина радиуса, пришедшего с предыдущего оборота заготовки, мм; K_3, K_4 – параметры при КШРП в зоне РЗ1, и РЗ2, находящиеся по формулам, Н/мм, (Н√мм)/мм:

$$K_3 = \frac{\pi d B n}{V_k} \sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta, \quad (5)$$

$$K_4 = \frac{\sigma_i \eta}{3} B \sqrt{\frac{dD}{D+d}}, \quad (6)$$

K_1, K_2 – параметры при КШОП в зоне НЗ, находящиеся по формулам, Н/мм, (Н√мм)/мм:

$$K_1 = \frac{\pi d \sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta S_{oc}}{V_p}, \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{\eta \sigma_i S_{oc}}{3n} \sqrt{\frac{dD}{D+d}}. \quad (8)$$

Формулы (3) и (4) позволяют вести расчет скорости текущего значения фактической подачи на каждом обороте заготовки в цикле шлифования с заданным количеством ступеней программных значений радиальной и осевой подач и условий шлифования при КШРП и КШОП, соответственно.

Значения радиальной составляющей силы резания рассчитываются по моделям (1) и (2) в зависимости от значений скорости фактической подачи, полученной по формулам (3) и (4). На рис.2 приведены графики программных и фактических подач заготовки, рассчитанные с использованием моделей (3) и (4), для двухступенчатого цикла при КШОП при шлифовании некруглой заготовки в зонах РЗ1, НЗ и РЗ2 за время одного двойного хода ДХ. График скорости фактической и программной подачи за оборот (мм/об) заготовки в зоне РЗ1 приведен на рис. 2А. Горизонтальная ось графика разделена на этапы в соответствии с табл. 1 и рис. 1Б. Расчет фактической скорости подачи на этапах Э1, Э2 и Э5 проводится по модели (3), а на этапах Э3 и Э4 – по модели (4). На рис. 2Б приведены графики накопленной программной и фактической подач (мм), полученные суммированием подач за оборот заготовки. Кроме того, на рис.2Б показана расчетная схема взаимосвязи радиусов заготовки с накопленными значениями программной и фактической подач $\Delta t \Phi_{k,i,m,z}$ и упругими деформациями технологической системы. На основании этой расчетной схемы получены модели (3) и (4). График осевой подачи (мм/мин) показан на рис. 2В, которая включается только на этапах Э3 и Э4. Аналогично построены графики в зонах РЗ2 (рис. 2Ё, 2Ж и 2З) и НЗ (рис. 2Г, 2д и 2Е). Экспериментальное подтверждение адекватности моделей (1) – (2) приведено в диссертационных работах П.П. Переверзева и В.Л. Кулыгина.

В третьей главе представлены результаты разработки математических моделей точности обработки в зонах РЗ1, РЗ2 и НЗ в

автоматическом ступенчатом цикле операции КШОП с ЧПУ, при чередовании разных видов и этапов шлифования.

Модель точности состоит из совокупности моделей расчета диаметральной погрешности вала, а также отклонений формы и расположения поверхностей в зонах Р31, Р32 и НЗ. Расчет погрешности обработки ведется в трех поперечных сечениях обрабатываемой поверхности вала, размещенных в зонах Р31, Р32 и НЗ. Профиль каждого сечения представляет собой совокупность расчетных значений нескольких радиусов обрабатываемой поверхности в конце цикла шлифования, на основании которых производится расчет параметров точности обработки. Исходный профиль заготовки во всех сечениях задается в форме эллипса, чтобы моделировать исходное радиальное биение заготовки.

На рис. 2 показаны графики фактических подач, рассчитанные при моделировании эллипсного профиля заготовки четырьмя радиусами. Поэтому графики фактических подач на рис. 2 имеют четыре пиковых участка на каждом обороте заготовки. Текущее значение радиуса обрабатываемой поверхности рассчитывается путем вычитания текущего значения фактической подачи из исходного радиуса заготовки в течение всего цикла шлифования. На рис. 2Б, Д и Ж показаны две траектории изменения текущих радиусов заготовки. Нижняя траектория показывает величину k -того радиуса $R_{\text{пришел}}$, пришедшего с предыдущего оборота заготовки. Верхняя траектория показывает величину k -того радиуса $R_{\text{ушел}}$ после шлифования на текущем обороте заготовки. Разность по высоте между траекториями равна фактической подаче за оборот заготовки. Из размерных связей на рис.2 видно, что текущее значение радиусов обрабатываемой поверхности $R_{k,i,m,z}$ на i -том ходе и z -той ступени цикла можно вычислить через разность текущего значения радиуса заготовки $R_{k,i,m-1,z}$ на каждом m -ом обороте заготовки и фактической подаче по следующей формуле:

$$R_{k,i,m,z} = \begin{pmatrix} \left(R_{k,i,m-1,z} \right)_{\text{Э1}}^{\text{КШРП}} - (\Delta t\phi_{k,i,m,z})_{\text{Э1}}^{\text{КШРП}} & \text{Э1 при КШРП / КШОП} \\ \left(R_{k,i,m-1,z} \right)_{\text{Э2}}^{\text{КШРП}} - (\Delta t\phi_{k,i,m,z})_{\text{Э2}}^{\text{КШРП}} & \text{Э2 при КШРП / КШОП} \\ \left(R_{k,i,m-1,z} \right)_{\text{Э3}}^{\text{КШОП}} - (\Delta t\phi_{k,i,m,z})_{\text{Э3}}^{\text{КШОП}} & \text{Э3 при КШОП / КШРП} \\ \left(R_{k,i,m-1,z} \right)_{\text{Э4}}^{\text{КШОП}} - (\Delta t\phi_{k,i,m,z})_{\text{Э4}}^{\text{КШОП}} & \text{Э4 при КШОП} \\ \left(R_{k,i,m-1,z} \right)_{\text{Э5}}^{\text{КШРП}} - (\Delta t\phi_{k,i,m,z})_{\text{Э5}}^{\text{КШРП}} & \text{Э5 при КШРП} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Расчет погрешности обработки ведется по значениям радиусов в конце цикла шлифования. Величина исходного радиального биения $\Delta R_{\text{заГ}}$ заготовки с эллипсным профилем имеет разное значение на каждом радиусе $R_{\text{заГ}_k}$ поверхности заготовки. Численное значение $\Delta R_{\text{заГ}_k}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta R_{\text{заГ}} = R_{\text{заГ}_{\text{max}}} - R_{\text{заГ}_k}, \quad (10)$$

где $R_{\text{заГ}_{\text{max}}}$ – максимальный радиус заготовки.

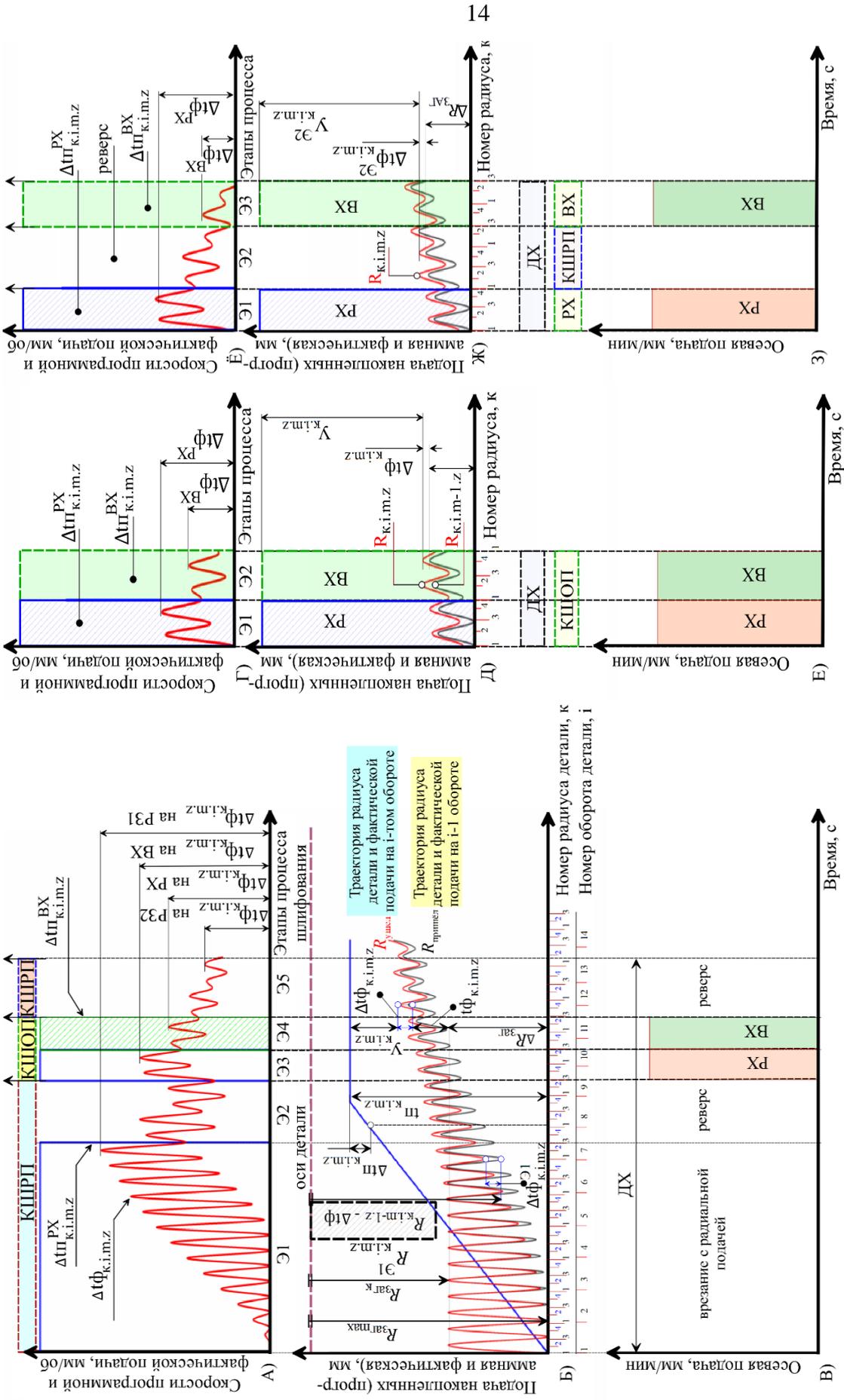


Рисунок 2 – Графики формообразования поверхности в зоне Р31, Н3 и Р32 при шлифовании некруглой заготовки за время одного двойного хода: графики программной и фактической радиальных подач (А, Г, Е); Графики накопленных программной и фактической радиальной подачи (Б, Д, Ж); график осевой подачи (В, Е, З)

Для прогнозирования точности обработки в цикле КШОП разработана модель точности обработки. Модель включает в себя прогнозирование погрешностей формы и расположения обрабатываемой поверхности по длине обрабатываемой поверхности вала. Полученные значения показателей погрешности обработки, рассчитанные в диссертации, сравниваются соответствующими допустимыми значениями, указанными на чертеже детали. В результате чего модель ограничений по точности обработки будет выглядеть следующим образом в трех зонах Р31, НЗ и Р32:

$$\begin{aligned} \delta^{3*} &= \begin{pmatrix} D_{\max}^{чер} - D_{\max}^{расч} \\ D_{\min}^{чер} - D_{\min}^{расч} \end{pmatrix}, \\ \delta_{рб}^{3*} &= (R_{k,i,m,z}^{\max} - R_{k,i,m,z}^{\min}), \\ \delta_{кр}^{3*} &= \max(\Delta_1 + \Delta_2)^{3*}, \\ \delta_{ц}^{3*} &= (\Delta_{отк} + \Delta_{проф})^{3*}, \\ \delta_{прб}^{3*} &= (R_{k,i,m,z}^{\max} - R_{k,i,m,z}^{\min})^{3*}. \end{aligned} \quad (11)$$

где $D_{\max}^{расч}, D_{\min}^{расч}$ – максимальное и минимальное расчётное значение диаметра на m - обороте заготовки, на i - ходе z -ой ступени в зоне Р31, НЗ и Р32, мм; $D_{\max}^{чер}, D_{\min}^{чер}$ – максимальное и минимальное допустимое значение диаметра по чертежу в зоне Р31, НЗ и Р32; $R_{k,i,m,z}^{\max}, R_{k,i,m,z}^{\min}$ – соответственно, максимальное и минимальное значение радиуса обработанной поверхности в конце цикла шлифования в зонах Р31, Р32 и НЗ; Δ_1 – абсолютное значение наибольших отклонений, мм; Δ_2 – абсолютные значения точек реального профиля по обе стороны от среднего элемента, мм; $\Delta_{отк}$ – абсолютное значение наибольших отклонений, мм; $\Delta_{проф}$ – абсолютные значения точек реального профиля по обе стороны от среднего элемента, мм; $\delta^{3*}, \delta_{рб}^{3*}, \delta_{кр}^{3*}, \delta_{ц}^{3*}, \delta_{прб}^{3*}$ – расчетные значения погрешности диаметров, радиального биения, отклонения от круглости, от цилиндричности, полного радиального биения в трех зонах Р31, НЗ и Р32, мм.

На операции КШОРП условия обработки и в зонах Р31, НЗ и Р32 существенно различны, что обуславливает разную погрешность обработки в этих зонах. Поэтому доказательство адекватности моделей точности обработки, выполнено путем экспериментального сравнения погрешностей обработки партии деталей в зонах Р31, НЗ и Р32 (табл.2). Эксперименты проводились в заводских условиях. Шлифовалась партия деталей при одинаковых режимах резания, с заданными циклами радиальной и осевой подачи. После шлифования партии деталей, каждая деталь измерялась в трех зонах Р31, НЗ и Р32. Чтобы учесть влияние переменных условий шлифования, шлифовалась партия деталей из 50 штук. По моделям погрешности обработки, для заданных условий шлифования проводился прогнозный (теоретический) расчет диапазона погрешности обработки в зонах Р31, НЗ и Р32. Затем была проведена статистическая обработка

экспериментальных данных и расчета доверительного интервала их попадания по критерию Стьюдента с вероятностью 95%. Условие адекватности моделей расчета погрешности обработки вала для заданного цикла шлифования с учетом переменных факторов при обработке партии деталей, значит уравнение адекватно, получили (табл.2).

Таблица 2 – Проверка адекватности математической модели для расчета погрешности обработки в трех зонах, вал 30h6 (-0.016)

Обозначение зоны обрабатываемой поверхности вала	Теоретические		Экспериментальные						Проверка адекватности модели		
	Колебания погрешности диаметра вала, мкм		Погрешность обработки диаметра вала в разных зонах, мкм						экспериментальные значения попадают в прогнозный диапазон		
			P31		H3		P32				
	min	max	5	6	9	10	9	8	интервал	min	max
P31	4	8	7	7	12	11	7	11	0.51	6.57	7.51
H3	10	16	6	5	17	16	14	8	0.79	13.21	14.79
P32	8	12	9	7	10	16	12	12	0.58	10.78	11.59
Обозначение зоны обрабатываемой поверхности вала	Теоретические		Экспериментальные						Проверка адекватности модели		
	Колебания отклонения от круглости диаметра вала, мкм		Отклонение от круглости, максимальное в разных зонах, мкм						экспериментальные значения попадают в прогнозный диапазон		
			P31		H3		P32				
	min	max	1	1	4	3	2	2	интервал	min	max
P31	1	2	2	2	3	2	4	4	0.23	1.23	1.96
H3	3	4	2	3	5	4	3	3	0.23	3.69	3.73
P32	2	3	1	2	3	3	3	3	0.22	2.64	2.72
Обозначение зоны обрабатываемой поверхности вала	Теоретические		Экспериментальные						Проверка адекватности модели		
	Колебания радиального биения поверхности вала, мкм		Радиальное биение, максимальное в разных зонах, мкм						экспериментальные значения попадают в прогнозный диапазон		
			P31		H3		P32				
	min	max	1	3	2	6	2	4	интервал	min	max
P31	1	3	4	2	3	3	2	3	0.29	2.23	2.59
H3	3	6	2	3	3	5	3	5	0.41	4.49	5.21
P32	2	5	2	1	4	4	3	4	0.39	3.46	3.89

Колебания погрешности диаметра вала: для первого ряда P31, что математическое ожидание 95% вероятностью лежит в диапазоне от (6,06 - 0,52) до (6,06 + 0,52), что находится внутри теоретического диапазона от 4 до 8. Для среднего ряда H3 от (12.42 - 0,79) до (12.42 + 0,79), что находится внутри теоретического диапазона от 10 до 16. В зоне P32 от (10.2 - 0.58) до (10.2+0.58), находится внутри диапазона от 8 до 12 мкм. **Колебания отклонения от круглости диаметра вала:** в P31, колебания отклонения от круглости диаметра вала), лежат в диапазоне от (1.7 - 0.23) до (1.7 + 0.23) мкм, что находится внутри теоретического диапазона от 1 до 2 мкм и т.д. в зонах H3 и P32. **Колебания радиального биения поверхности вала:** Для первого ряда (P31, радиального биения поверхности вала)

математическое ожидание с 90 - 95% вероятностью лежит в диапазоне от $(2.24 - 0.29)$ мкм до $(2.24 + 0.29)$ мкм, что находится внутри теоретического диапазона от 1 до 3 мкм и т.д. в зонах НЗ и РЗ2.

Таким образом, выполненный статистический анализ показал достаточную точность разработанных моделей расчета погрешности обработки вала для заданного цикла шлифования с учетом переменных факторов при обработке партии деталей в трех зонах РЗ1, НЗ и РЗ2. Экспериментальная проверка подтвердила адекватность моделей расчета погрешности.

В четвертой главе представлена методика оптимизации циклов радиальной и осевой подач.

Оптимизация циклов радиальной и осевой подач проведена методом полного перебора параметров цикла во всех зонах РЗ1, НЗ, РЗ2 по всем основным ограничениям целевой функции, связанным с чертежными требованиями детали (точность, прижог и шероховатость), конструктивными параметрами станка (диапазоны параметров режимов резания, податливость ТС), характеристикой круга (осыпаемость, затупление зерен круга). Для обеспечения стабильности требуемых параметров качества обрабатываемой поверхности валов при шлифовании партии деталей, необходимо разработать оптимальный цикл шлифования, устойчивый к воздействию различных переменных технологических факторов (колебание припуска и исходного радиального биения заготовки, затупление зерен круга и диаметральный износ круга, переменная податливость технологической системы, чередование разных видов шлифования в реверсных зонах). Для экспериментальной проверки методики оптимизации циклов подач, сравнивалась погрешность обработки деталей при двух сценариях, когда партия деталей обрабатывалась по заводским циклам шлифования и когда партия деталей шлифовалась по оптимальным циклам шлифования, рассчитанным по разработанной методике оптимизации циклов, с учетом разной точности обработки в зонах РЗ1, НЗ и РЗ2. Для учета нестабильных условий шлифования, имеющих место при обработке партии деталей, эксперименты проводились при обработке партии деталей из 50 штук.

Проверка адекватности методики проектирования оптимальных циклов управления радиальной и осевой подачами при КШОП и КШРП выполнена путем сравнения производительности заводского и расчетного оптимального циклов радиальной и осевой подач при КШОП деталей типа вала (табл.3). Оптимизация циклов подач проводилась при сценарии, что прибор активного контроля, управляющий циклами радиальной и осевой подач по величине оставшейся части припуска, установлен в середине зоны НЗ и переключение подач проводится для зон РЗ1 и РЗ2 на одном и том же ходе. В таблице 3 приведены результаты сопоставления заводских и оптимальных циклов, полученных на основании применения разработанной методики проектирования оптимальных циклов. Готовые изделия обеспечивают требования по точности и качеству с учетом снижения времени на обработку.

Таблица 3 – Сравнение значения и вывод циклов (базовый и оптимальный), (подробный расчет представлен в диссертации)

Детали	Параметры точности		Заводской			Оптимальный	
			Заводские значения показателей точности, мм			Расчетные значения показателей точности, мм	
Вал 30h6 (-0.016)	Погрешность диаметра		0.008			0.0085	
	Отклонение от круглости		0.0026			0.003	
	Радиальное биение		0.0021			0.0024	
	Параметры цикла шлифования						
	Марка материала: Сталь 40X ГОСТ 4543-71; Твердость 63 HRC; Диаметр обработки: 30h6; Шероховатость: Ra 1,6; круглошлифовальный станок 3210 CNC; СОЖ: Базовая-0,1–0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды, ГОСТ 10689-70; Скорость вращения круга – 30 м/с; Число оборотов изделия – 180 об/мин.						
	Вариант цикла	Номер ступени цикла	Поперечная подача мм/дв. ход	Припуск, снимаемая на ступени цикла, мм	Осевая подача, мм/мин	Основное время, мин	Сравнение основного времени, %
	Заводской	1	0,004	0,110	1800	2,4	↓ 20,8%
		2	0,001	0,040	300		
	Оптимальный	1	0,005	0,120	2000	1,9	
		2	0,002	0,030	500		
Детали	Параметры точности		Заводской			Оптимальный	
			Заводские значения показателей точности, мм			Расчетные значения показателей точности, мм	
Вал 38,74 h6 (-0.016)	Погрешность диаметра		0.0072			0.007	
	Отклонение от круглости		0.0016			0.0019	
	Радиальное биение		0.002			0.003	
	Параметры цикла шлифования						
	Марка материала: Сталь 40X ГОСТ 4543-71; Твердость 63 HRC; Диаметр обработки: 30h6; Шероховатость: Ra 1,6; круглошлифовальный станок 3210 CNC; СОЖ: Базовая-0,1–0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды, ГОСТ 10689-70; Скорость вращения круга – 30 м/с; Число оборотов изделия – 180 об/мин.						
	Вариант цикла	Номер ступени цикла	Поперечная подача мм/дв. ход	Припуск, снимаемая на ступени цикла, мм	Осевая подача, мм/мин	Основное время, мин	Сравнение основного времени, %
	Заводской	1	0,003	0,122	2210	4.6	↓ 19,5%
		2	0,001	0,010	800		
	Оптимальный	1	0,004	0,130	2500	3.7	
		2	0,002	0,020	900		

В результате проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность мероприятий, представленных в данной диссертационной работе, а также возможность использования разработанной методики проектирования циклов управления радиальной и осевой подачами на операциях КШОП в условиях цифровизации машиностроительных производств.

Оптимальный цикл при КШОП на станках с автоматическим циклом управления радиальной и осевой подачами обеспечивает соответствие обработанной поверхности требованию чертежа при обработке партии

заготовок с учетом реального изменения переменных технологических факторов, к которым относятся: исходное радиальное биение заготовки, степень затупления круга, диаметр круга, переменная податливость технологической системы, припуск на обработку и скорость круга. Каждый из этих факторов имеет свой диапазон варьирования в зонах Р31, НЗ и Р32 при КШОП, а также в сочетании с другими переменными и постоянными условиями шлифования, оказывает соответствующее влияние, как на параметры самого цикла шлифования, так и на параметры точности и качества поверхностного слоя шлифованной поверхности в зонах Р31, НЗ и Р32. Результаты работы внедрены на предприятиях «Усть-Катавский вагоностроительный завод имени С.М. Кирова»-филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», а также в учебный процесс ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)».

В приложениях приведены акты о внедрении результатов работы на АО «УКВЗ» и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета текущих значений фактических подач на этапе врезания и за время всех реверсных остановок с учетом чередования разных видов шлифования во всех трех зонах Р31, НЗ и Р32 обрабатываемой поверхности вала при нестабильных условиях шлифования партии деталей круглого наружного шлифования с осевой подачей для операций КШОП, выполняемых на круглошлифовальных станках с ЧПУ.

2. Разработана методика расчета текущих значений радиусов во всех трех зонах Р31, НЗ и Р32 обрабатываемой поверхности вала с учетом исходного радиального биения заготовки и колебания припуска на обработку в партии деталей для заданных условий шлифования.

3. Разработана модель, позволяющая для операции круглого наружного шлифования с осевой подачей прогнозировать погрешность обработки для заданных циклов управления радиальной и осевой подачами на операции КШОП с ЧПУ с учетом особенностей шлифования во всех трех зонах Р31, НЗ и Р32.

4. Разработана методика проектирования оптимальных циклов радиальной и осевой подач на операции КШОП с ЧПУ, устойчивых к воздействию различных переменных технологических факторов (колебание припуска и исходного радиального биения заготовки, затупление зерен круга и диаметральный износ круга, переменная податливость технологической системы, чередование разных видов шлифования в реверсных зонах) и обеспечивающей стабильность требуемых параметров качества обрабатываемой поверхности вала шлифуемой партии деталей.

5. Проведены эксперименты по доказательству адекватности моделей погрешности во всех трех зонах Р31, НЗ и Р32. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных, доказательство адекватности

моделей и расчета доверительного интервала их попадания во всех трех зонах РЗ1, НЗ и РЗ2, на этапе врезания и за время всех реверсных остановок.

6. Доказана эффективность разработанной методики проектирования оптимальных циклов совместного управления радиальной и осевой подачами с учетом технологических ограничений и нестабильных условий шлифования партии деталей для операций КШОП, применение которой позволило повысить производительность операций в среднем на 18% по сравнению с действующими на предприятии технологическими процессами.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ

1. Альсигар, М.К. Моделирование процесса съема металла в автоматических циклах круглого наружного шлифования с продольной подачей /П.П. Переверзев, М.К. Альсигар// Металлообработка. – 2017. – №6(102). – С. 2–8.

2. Альсигар, М.К. Современные методы математического моделирования процесса съема металла и основных элементов режима резания при шлифовании с продольной подачей /П.П. Переверзев, М.К. Альсигар// Металлообработка. – 2017. – №2(104). – С. 23–27.

3. Альсигар, М.К. Модель съема припуска в реверсных и нереверсных зонах для операций круглого шлифования с продольной подачей /П.П. Переверзев, М.К. Альсигар// Металлообработка. – 2017. – №3(105). – С. 19–24.

4. Альсигар, М.К. Моделирование взаимосвязи силы резания с основными технологическими факторами при круглом шлифовании с продольной подачей /П.П. Переверзев, М.К. Альсигар// Современные фундаментальные и прикладные исследования. – 2017. – №4(27). – С. 38–44.

5. Альсигар, М.К. Виртуальное формообразование обрабатываемой поверхности при круглом наружном шлифовании с осевой подачей в реверсных и нереверсных зонах /М.К. Альсигар, П.П. Переверзев// Вестник ИрГТУ. – 2018. – №8(139). – С. 10–16.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

6. Alsigar, M.K. Use of dynamic programming method to design for optimal performance of grinding cycles /P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar//Proceedings of the 4th international conference on industrial engineering. –2018.–pp. 1709-1714.

7. Alsigar, M.K. Modeling relationship between different stages of cylindrical grinding process with axial feed /P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar// Proceedings of the 4th international conference on industrial engineering. –2018.–pp. 1715-1722.

8. Alsigar, M.K. Improvement of the quality of designed cylindrical grinding cycle with traverse feeding based on the use of digital twin options /P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar// International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. – 2018. – vol. 224 –01033.

9. Alsigar, M.K. Impact of metal removal features in the reverse zones on shaping of the machined surface in the process of cylindrical grinding with traverse feed /P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar// International conference on modern trends in manufacturing technologies. – 2018. – vol. 224 –01034.

10. Alsigar, M.K. Designing of optimal grinding cycles, sustainable to unstable mechanical processing on the basis of synthesis of digital double technology /P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar//Proceedings of the 5th international conference on industrial. –2019.–pp. 225-232.

11. Alsigar, M.K. Designing optimal automatic cycles of round grinding based on the synthesis of digital twin technologies /P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar// Mechanical sciences "MS" is published by Copernicus GmbH. – 2019. – vol. 10.–pp. 331-341.

12. Alsigar, M.K. Model of processing accuracy prediction with consideration of multi-stage process of circular grinding with axial feed /M.K. Alsigar, P.P. Pereverzev, A.D.

Almawash// International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. – 2019. – vol. 709. – pp. 9-14.

13. Alsigar, M.K. Virtual Prediction of Accuracy of Processing on Example of External Circular Grinding /P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar// Proceedings of the 5th international conference on industrial engineering. –2019.–pp. 217-224.

14. Alsigar, M.K. Multi-stages to ensure quality control of designing and production at external cylindrical grinding machines /M.K. Alsigar, P.P. Pereverzev, A.D. Almawash// International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. – 2020. – vol. 95. – pp. 23-28.

15. Alsigar, M.K. Modeling metal removal in automatic circular grinding cycles taking into account process dynamics /P.P. Pereverzev, A.D. Almawash, M.K. Alsigar// Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). – 2020.– pp. 335-343.

16. Alsigar, M.K. An approach to complex model ECGA for the stable and unstable grinding conditions/ M.K. Alsigar, P.P. Pereverzev, A.D. Almawash// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. – 022097.

17. Alsigar, M.K. Optimal design of grinding systems with use of mathematical complex models ECGA/M.K. Alsigar, A.D. Almawash// Proceedings. International Confon modern trends in manufacturing technologies. – 2021. – Vol. 38. – P. 4. – pp. 1521-1525.

Публикации в других изданиях

18. Альсигар, М.К. Методические подходы к моделированию тепловых явлений при круглом шлифовании с продольной подачей при помощи MathCAD /М.К. Альсигар// научный поиск материалы девятой научной конференции аспирантов и докторантов. – Челябинск: ЮУрГУ, 2017. – С. 90–97.

19. Альсигар, М.К. Совершенствование модели распределения тепла в зоне контакта в процессе круглого шлифования с продольной подачей на основе учета параметров применения удельной энергии /М.К. Альсигар// научный поиск материалы девятой научной конференции аспирантов. – Челябинск: ЮУрГУ, 2017. – С. 81–90.

20. Альсигар, М.К. Математическое моделирование процесса силы резания при шлифовании с продольной подачей /П.П. Переверзев, М.К. Альсигар// Материалы V международной конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №5. – С. 49–55.

21. Альсигар, М.К. Анализ влияния технологических ограничений на производительность цикла круглого шлифования при одновременном управлении двумя подачами /М.К. Альсигар, П.П. Переверзев, А.В. Акинцева// Научный поиск: материалы одиннадцатой научной конференции аспирантов и докторантов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – С. 33–38.

22. Альсигар, М.К. Математические исследования и моделирование процесса съема металла при наружном шлифовании с продольной подачей /М.К. Альсигар, П.П. Переверзев// Мехатроника, автоматика и робототехника: Материалы международной научно-практической конференции. –Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – №2. –С. 55–61.

23. Альсигар, М.К. Управление процессом формообразования на круглошлифовальных станках с осевой подачей / П.П. Переверзев, М.К. Альсигар// Машиностроение: инновационные аспекты развития: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС, 2018. – №1. – С. 86–88.

24. Альсигар, М.К. Прогнозирование надежности управляющих программ для станков с ЧПУ с помощью цифрового двойника /П.П. Переверзев, А.В. Акинцева, М.К. Альсигар// Сборник трудов XXV международной конференции. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т. 2. – С. 54–58.

25. Alsigar, M.K. Mathematical model to predict material removal rate of reverse zones / M.K. Alsigar // Journal of advanced research in technical science. –North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. –2018. – Issue 9-1. – pp. 27-30.

26. Alsigar, M.K. Theoretical design approach of cycles in reversible zones/ M.K. Alsigar, A.D. AlMawash, P.P. Pereverzev// international conference “management and scientific developments "United Kingdom, 2020. – С. 117–120.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. Расчет оптимального цикла для операции круглого наружного шлифования / М.К. Альсигар, А.В. Акинцева, П.П. Переверзев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019613966 от 26.03.2019 г.

АЛЬСИГАР МАСАР КАДИМ

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО
ШЛИФОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ ПУТЁМ ОПТИМИЗАЦИИ
ЦИКЛОВ РАДИАЛЬНОЙ И ОСЕВОЙ ПОДАЧ

Специальность 05.02.08 технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 23.04.2021. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд.л.1. Тираж 100 экз. Заказ 105/183

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.