На правах рукописи
УДК 658.01154/56

АШКИНАЗИЙ Яков Михайлович

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ИЗ БЕСЦЕНТРОВЫХ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ С ШИРОКИМИ КРУГАМИ ЗА СЧЕТ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРАВКИ

Специальность: 05.13.07. – Автоматизация технологических процессов и производств (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

2000

Работа выполнена в ОАО «ЭНИМС»

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат государственной премии СССР, член-корреспондент Академии технологических наук РФ, доктор технических наук, профессор, Черпаков Б.И.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1566786
Ашкиназий я.М. Повышение п

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, проф. Капустин Н.М.
Кандидат технических наук, доцент
Вайс С.Д.

Ведущая организация: ОАО «Специальное
торское бюро
ских линий и
ых станков»

)0 г. в 14 час. 30 мин.
(153.51.01 в МГТУ им.
.нская ул., д.5.
3

экземпляре, заверенный
у адресу.

ся в библиотеке МГТУ

1566786

! 2000 г.

Рябов В.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Высокие требования предъявляются к качеству продукции и точности обработки на металлорежущих станках при сохранении заданной производительности. Автоматические линии, потоки и цехи из них эффективны в крупносерийном и массовом производстве в автомобильной, подшипниковой, электротехнической промышленности, тракторном и сельскохозяйственном машиностроении, при изготовлении бытовой техники и в других производствах.

Во многих случаях единственным методом обработки высокоточных деталей является применение абразивного инструмента.

В автоматических линиях для обработки колец карданных, шариковых, роликовых и других подшипников, а также для обработки поршневых пальцев, поршней, втулок, золотников и других деталей типа тел вращения применяются бесцентровые круглошлифовальные станки (БКС) с широкими кругами.

Промышленность СССР освоила в 80-90-е гг. выпуск многих совершенных моделей шлифовальных станков, в т.ч. БКС с широкими кругами (*l* до 750 мм). Такие БКС составляют до 20% общего количества технологического оборудования, например, в линиях подшипниковой промышленности.

БКС относятся к «традиционным станкам», исследования по которым были выполнены в 60-80-е гг. а процессы шлифования и правки были изучены еще раньше. Это позволяет использовать агрегатно-модульный принцип построения БКС и создавать типовые конструкции основных узлов.

Специфика использования БКС, в том числе в автоматических линиях, заключается в затратах значительного времени на правку рабочего круга, где процесс в большинстве случаев не автоматизирован. Для станков, работающих напроход, время, затрачиваемое на правку, относится к внецикловым потерям и оно составляет до 15%. Для станков, работающих врезанием, правка входит в цикл, однако, внутри него затраты времени на правку составляют 10-15%. Расход шлифовальных кругов при правке составляет до 90% их полезного объема, а затраты на правку – до 70% от себестоимости операции.

Однако даже в условиях автоматических линий из БКС цикл правки полностью не автоматизирован. Под термином «автоматизация процесса правки» понимают автоматическое перемещение каретки прибора правки вдоль круга или использование вместо единичного алмаза ролика, а процесс определения необходимости правки, подвод алмаза к кругу и круга к заготовке после правки отдают на откуп рабочему.

За последние десятилетия в конструкциях отечественных БКС мало что изменилось. За рубежом активно ведутся работы по

МГТУ
им. Н.Э.

совершенствованию БКС и отдельных узлов. Появились БКС с многокоординатными ЧПУ типа CNC для управления циклом шлифования и правки. Однако, в условиях массового производства они не нашли применения.

Высокое качество продукции, особенно в условиях массового производства, требует стабильных результатов правки абразивных кругов.

Несмотря на значительные успехи, разработка научных основ автоматизации правки кругов еще далека от завершения.

Своевременная и качественная правка абразивного круга является актуальной задачей, решение которой позволит увеличить выпуск продукции со станка, уменьшить расход абразива и правящих средств, повысить качество обработки. Результаты проведенных исследований приборов правки и автоматизации процесса будут использованы при создании новых и модернизации действующих БКС с широкими кругами.

Цель работы: 1) Научное обоснование возможности повышения производительности автоматических линий из БКС с широкими кругами за счет автоматизации правки.

2) Научное обоснование требований и методики создания приборов правки с современным уровнем автоматизации процесса для конкурентоспособных БКС с широкими кругами и автоматических линий из них.

3) Разработка рекомендации по модернизации приборов правки и систем их автоматизации на действующих БКС с широкими кругами для обеспечения эффективного функционирования автоматических линий.

4) Разработка требований к техническим характеристикам приборов правки и средствам автоматизации процесса для возможности сертификации продукции – БКС с широкими кругами.

Для достижения поставленных целей **в работе решены следующие задачи**:

1. Доказана перспективность повышения производительности автоматических линий из БКС за счет автоматизации правки шлифовального круга.

2. Исследованы приборы правки БКС с широкими кругами для возможности автоматизации процесса (кинематическая точность подачи алмаза, стабильность работы копирной системы и анализ динамики процесса копирования, статическая жесткость приборов и ее влияние на качество правки и шлифования, равномерность продольных перемещений каретки и тепловые деформации) и на этой основе разработаны рекомендации по улучшению технических характеристик и качества эксплуатации, повышению надежности и долговечности.

3. Исследованы элементы цикла, позволяющие создать автоматическую правку шлифовального круга: методы подвода алмаза к

кругу, точность выхода на размер после правки; разработка типовых рекомендаций по организации работы БКС после правки круга.

4. Исследована совместная работа БКС и прибора активного контроля, установленного вне рабочей зоны, и разработан цикл подналадки.

5. Проведен анализ ожидаемой экономической эффективности автоматизации процесса правки и определена рациональная область ее применения в зависимости от ширины кругов на БКС.

Методы исследования. В работе используются элементы теории автоматизации производственных процессов в машиностроении, точности, динамики производственных систем, математической статистики. Математическая обработка полученных результатов проводилась на персональном компьютере.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Предложен метод повышения производительности автоматических линий из БКС с широкими кругами за счет автоматизации процесса правки.

2) Разработаны универсальные методики исследования приборов правки БКС с широкими кругами по параметрам кинематической точности подачи алмаза, стабильности работы копирной системы и анализу динамики процесса копирования, статической жесткости приборов и ее влияния на качество правки и шлифования, равномерности продольных перемещений каретки с алмазом и тепловых деформаций.

3) Получены численные значения параметров, характеризующих качество функционирования приборов правки: кинематической точности подачи алмаза, стабильности работы копирной системы и динамики процесса копирования, статической жесткости приборов правки, равномерности продольных перемещений и тепловых деформаций, гарантирующих качественное выполнение правки и шлифования на БКС с широкими кругами и целесообразность автоматизации процесса.

4) Разработана методика построения комплексной системы автоматической правки широких кругов на БКС, объединяющая элементы: подачу команды на правку круга, отвод круга от шлифуемых заготовок, подвод алмаза к кругу, поперечная и продольная подачи алмаза в крайних положениях, установление числа проходов при правке, выход после правки на размер шлифуемых деталей. Исследованы и даны рекомендации по выбору методов подвода алмаза к кругу и точности выхода после правки на размер шлифуемых деталей.

5) Предложен метод построения автоматического цикла шлифования на БКС с широкими кругами после правки, при использовании прибора активного контроля, основанный на двух режимах подналадки: ускоренной, в первый период работы сразу после правки (~ 10 мин) и нормальный (весь дальнейший отрезок времени до последующей правки).

Практическая ценность работы состоит:

- в разработке методики повышения производительности автоматических линий из БКС с широкими кругами за счет автоматизации процесса правки;
- в разработке методики комплексного анализа параметров приборов правки БКС с широкими кругами для возможности автоматизации процесса правки;
- в разработке методики комплексной автоматизации процесса правки на БКС с широкими кругами;
- в получении исходных требований к приборам правки БКС с широкими кругами для возможности создания новых конкурентоспособных конструкций, модернизации действующего оборудования, сертификации их качества.

Полученные результаты переданы в Госстандарт РФ, ОАО «Московский завод автоматических линий и специальных станков», ОАО «Московский подшипник», ОАО «Московское специальное конструкторское бюро автоматических линий и специальных станков» для практического использования.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на научном семинаре в ОАО «ЭНИМС», на технических советах в ОАО «Московский завод автоматических линий и специальных станков и ОАО «Специальное конструкторское бюро автоматических линий и специальных станков», в техническом отделе ОАО «Московский подшипник (ГПЗ-1)».

Публикации. По содержанию и результатам диссертационной работы опубликованы три печатные работы и одна находится в печати.

Структура и объем диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 143 стр. машинописного текста, содержит 68 рисунков, 15 таблиц, списка отечественной и иностранной литературы из 96 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены тенденции развития БКС с широкими кругами в условиях массового производства; требования, предъявляемые к приборам правки и автоматизации процесса. За рубежом происходит конструктивное совершенствование БКС, в РФ за последнее десятилетие в этих станках мало что изменилось. Показано, что автоматизация процесса правки является эффективным мероприятием и, в первую очередь, для БКС с широкими кругами.

В главе 1 приведены сведения о типовых автоматических линиях из БКС с широкими кругами, работающих напроход и врезанием, и аналитические зависимости для расчета их производительности с учетом затрат времени на правку шлифовального круга.

Выполнен обзор работ по состоянию автоматизации процесса правки на БКС. По литературным источникам и опытным данным, имеющимся в промышленности, проведен анализ конструкций приборов правки шлифовального круга на БКС и алмазного инструмента в СССР (РФ) и за рубежом на основе современных представлений о правке кругов и степени ее автоматизации. Повышение производительности и качества шлифования во многом зависит от своевременной и качественной правки круга, которая в свою очередь определяется конструкцией прибора правки, правящим инструментом, режимами правки и состоянием автоматизации процесса.

Отмечено, что для правки широких шлифовальных кругов наиболее эффективно применение зачеканенных однокристальных алмазов.

Автоматизация правки позволит обеспечить ее рациональный цикл, сократив время технического обслуживания, уменьшив расход абразивного инструмента и правящих средств, при повышении качества обработки. Управление процессом правки перестанет зависеть от квалификации и внимания рабочего.

Рассмотрена специфика конструкций приборов правки БКС с многокоординатными ЧПУ типа CNC. Отмечена перспективность этих конструкций в случае применения БКС в условиях серийного производства при переналадках. В условиях массового производства наиболее экономичны традиционные конструкции с управлением от программируемых контроллеров.

Приведен анализ комплексной автоматизации процесса правки: подвод алмаза к кругу до правки, выход на размер после правки, совместная работа станка и прибора активного контроля в первый период после правки. Однако, исследованию этих вопросов уделяется мало внимания. В связи с этим разработка рекомендаций по конструированию и эксплуатации приборов правки и комплексной автоматизации процесса представляют значительный интерес для промышленности в части создания новых конкурентоспособных конструкций, модернизации действующего оборудования, возможности их сертификации.

В главе 2 приведены результаты исследования приборов правки шлифовального круга БКС.

Разработана методика и исследована кинематическая точность подачи алмаза. На каждом звене кинематической цепи прибора правки могут образоваться погрешности, которые, складываясь, создают суммарную ошибку звена. Эта ошибка передается по линии действия кинематической цепи к пиноли, вызывая дополнительную подачу алмаза с соответствующим знаком.

Наиболее вероятные значения суммарных ошибок звеньев определяют как квадратичные суммы составляющих ошибок.

Точностной теоретический анализ механизма подачи алмаза прибора правки БКС модели 6С137 показал, что накопленная

погрешность подачи, приведенная к алмазу, не превышает 2 мкм. Аналогичные результаты были получены на стенде, оборудованном на указанном станке. Подача алмаза измерялась индикатором типа ИГМ. Величина подачи – 38 мкм. По полученным результатам вычислены среднеарифметическое и среднеквадратичное отклонения подачи алмаза $\bar{x}$ = 38 мкм, $\sigma \cong 2{,}5$ мкм; при вариации отдельных значений 7 мкм. Наибольшее влияние на точность подачи алмаза оказывают конечные звенья механизма: червячная пара и ходовой винт.

При исследовании точности копирной системы прибора правки определялись:

1) стабильность работы при многократном повторении ходов;

2) воспроизведение формы копира при прямом и обратном ходах каретки прибора правки;

3) влияние на стабильность работы скорости продольного перемещения каретки прибора правки.

В качестве стенда использовался станок мод.МЕ397С1. Вместо шпинделя шлифовального круга устанавливалась поверочная линейка. В пиноли прибора правки крепилась специальная оправка с индуктивным датчиком, электрический сигнал которого поступал к самопишущему прибору БВ-662 завода «Калибр», который развертывал сигнал на миллиметровой ленте.

Для каждого профиля копирной линейки делалась запись пяти прямых и обратных ходов каретки прибора правки при скоростях продольного перемещения 100-400 мм/мин. Затем профили накладывались и совмещались по характерным точкам (стабильность работы проверялась на холостом ходу без учета усилий, возникающих при правке). Обработка результатов проводилась с помощью положений теории ошибок. При числе измерений ≥ 2 дифференциальный закон распределения представляет плотность вероятностей в распределении Стьюдента и само распределение зависит только от числа измерений и их отдельных значений x_1; x_2; x_3; … , которые входят в величину нормированного отклонения. За приближенное значение ошибки стабильности работы копирной системы a принимаем математическое ожидание $\bar{x}$, так как равенство $a \approx \bar{x}$ свободно от постоянной погрешности. Принята 95%-ная вероятность.

Ошибка копирной системы лежит в интервале:

$$P(\bar{x} - \xi < a < \bar{x} + \xi) = \alpha, \qquad (1)$$

где ξ – точность приближенного равенства $a \approx \bar{x}$: α – надежность равенства (1), $\alpha = 0{,}95$.

Установлено:

1. Нестабильность работы копирной системы прибора правки БКС МЕ397С1 при многократном повторении ходов каретки с вероятностью 95% не превышает 2,5 мкм; при вариации отдельных значений 5 мкм.

2. Точность воспроизведения формы копира при прямом и обратном ходах каретки не превышает общей погрешности копирной системы.

3. Изменение скорости продольного перемещения каретки прибора правки в диапазоне 100-400 мм/мин не влияет на стабильность работы копирной системы.

Разработана методика и производилась оценка влияния динамических характеристик прибора правки на силовое замыкание в системе «палец – копирная линейка». Для определения условий постоянства силового замыкания (условие отсутствия разрыва кинематической цепи) составлено уравнение движения пиноли с алмазом с учетом ее упругости. Копирная система прибора правки рассматривается как плоский кулачковый механизм с центральным толкателем. В этом случае можно представить: движение массы m с одной степенью свободы под действием внешней силы P, представляющей сумму активных сил и сил трения, действующих на пиноль прибора правки, и силы упругости ведомого звена, которая представлена в виде пружины с жесткостью K_2. При движении прибора правки по линейке возьмем одно из мгновенных положений. Обозначим перемещение копирного пальца от нулевого положения S, а перемещение ведомой массы, сосредоточенной условно в конце пиноли, Y.

Уравнение равновесия сил имеет вид:

$$-P + K_2(S - Y) = m\ddot{Y}. \qquad (2)$$

где $P = P_п - P_{пр} + P_{тр}$; $P_п$ – осевая составляющая усилия, возникающего при правке; $P_{пр}$ – сила замыкающей пружины; $P_{тр}$ – сила трения.

Произведя подстановку и приравнивая к нулю упругую силу пиноли, получаем:

$$P_{по} = m\ddot{Y} - K_1 Y + P_{тр} + P_п, \qquad (3)$$

где $P_{по}$ – сила предварительного натяжения пружины; K_1 – жесткость пружины.

Величину усилия пружины находим из уравнения (3) на основании конкретного графика изменения сил, действующих на ведомое звено, и инерции, определяемых по заданному закону движения ведомого звена, с учетом упругости всех звеньев.

На основании выведенной зависимости рассмотрен пример для случая: часть профиля кулачка – дуга окружности, обеспечивающая перепад в один миллиметр (кулачок неподвижен); толкатель участвует в двух движениях – продольном и поперечном по отношению к профилю кулачка. Экспериментальная проверка стабильности силового замыкания копирной системы проведена на специальном стенде, который

оборудован на приборе правки БКС мод.МЕ397С1. Копирная линейка вместе с постелью изолируется от остальных деталей путем установки на гетинаксовую прокладку. Источник постоянного тока – набор сухих батарей напряжением 9 в соединяется одним полюсом с изолированной копирной линейкой, другим – с пальцем. При движении копирного пальца получается замкнутая электрическая цепь; в случае отрыва пальца – цепь размыкается. Для наблюдения за состоянием системы использовался осциллограф С1-8. Разрыв электрической цепи наблюдался визуально на индикаторе осциллографа. Скорость каретки прибора правки регулировалась в диапазоне 100-500 мм/мин. Пружины, обеспечивающие прилегание копирного пальца к линейке, были протарированы и выбраны согласно предварительному расчету.

При скорости продольного перемещения каретки прибора правки 100-500 мм/мин разрывов кинематической цепи не наблюдалось. Следовательно, инерционные силы, возникающие в приборе правки с копиром, имеющем перепад рабочих плоскостей до 1 мм, малы и не приводят к нарушению силового замыкания в копирной системе. Для данного случая предложена упрощенная формула выбора пружины, обеспечивающей силовое замыкание в приборе правки:

$$P_{пр} \geq (1,3 \div 1,5)\, P_{п}\,. \qquad (4)$$

При анализе статической жесткости приборов правки определялись:

1. Фактическая жесткость приборов правки БКС по номенклатуре ОАО «Московский завод автоматических линий и специальных станков».

2. Усилия, возникающие при правке алмазом.

3. Влияние жесткости приборов правки на качество правки и шлифования.

Для испытания приборов правки был создан специальный стенд. Прибор крепился на плите; вместо державки с алмазом устанавливалась оправка. Нагружение производилось через плоский динамометр конструкции ЭНИМС поочередно по трем осям аналогично для всех приборов правки. В связи с принятой в станкостроении линейностью жесткости, проведена линеаризация полученных результатов способом наименьших квадратов. Полученные значения жесткости приборов правки различных БКС представлены в таблице:

№№ пп	Прибор правки БКС мод.	Жесткость от силы, кг/мкм					
		P_z		P_y		P_x	
		норм.	касат.	норм.	касат.	норм.	касат.
1	МЕ39С1	0,35	5,0	1,45	3,4	0,43	6,8
2	6С133*)	0,74	4,5	1,87	11,05	1,48	8,7
3	6С71	0,48	1,8	0,91	2,46	0,35	2,8
4	6С137	0,31	2,7	1,45	5,1	0,52	6,3

*) БКС длительное время находился в эксплуатации

Для определения усилий при правке использовался оригинальный упрощенный метод. При правке единичным алмазом на БКС мод.6С137, налаженном на обработку врезанием дорожки качения внутреннего кольца роликоподшипника, прибор правки во время процесса останавливался на некоторый промежуток времени. Осуществлялось выхаживание. При этом снимались упругие деформации в системе «шлифовальный круг – прибор правки». Затем правка продолжалась на тех же режимах. Далее производилось шлифование врезанием (V подвода = 0,3 мм/мин) при глубине съема 0,1 мм. Записывался профиль микронеровностей обработанных колец вдоль образующей на профилографе – профилографе мод.201 завода «Калибр».

Анализ полученных результатов показал, что в месте остановки алмаза в процессе правки на детали при последующем шлифовании образовывался выступ из-за впадины на шлифовальном круге. Величина выступа в масштабе записи характеризует осевую составляющую усилия правки. Полученные значения осевой составляющей при правке $P_п$ = 8–10 кг.

Для определения влияния жесткости прибора правки на качество шлифования и правки использовалась державка с регулируемой жесткостью за счет изменения длины свободного конца упругого элемента, на котором крепилась оправка с алмазом. Задаваясь размерами упругого элемента, получены значения жесткости, равные 0,75; 1,00; 1,25; 1,35 кг/мкм.

Снимались круглограммы колец на приборе для контроля круглости мод.218 (3 и 4 фильтры) и профилограммы на профилографе-профилометре (оба завода «Калибр»). После этого проводились правка круга прибором пониженной жесткости и шлифование ранее обработанных колец и вновь снимались кругло- и профилограммы.

Влияние жесткости оценивалось по трем параметрам: отклонение от круглости, волнистость профиля и осевого сечения при сравнении колец шлифованных кругами, правка которых производилась прибором нормальной и пониженной жесткости.

Математическая обработка полученных результатов позволила установить эмпирическую зависимость отклонения от круглости (Δ), волнистости профиля (δ) и осевого сечения (H) обработанных деталей от жесткости приборов правки:

$$\Delta = 255\,e^{-3.07 j_{P_{y\Sigma}}} \text{ мкм}; \quad \delta = 113{,}6\,e^{-2{,}89 j_{P_{y\Sigma}}} \text{ мкм};$$

$$H = 736{,}2\,e^{-3{,}3 j_{P_{y\Sigma}}} \text{ мкм}, \qquad (5)$$

где $j_{P_{y\Sigma}}$ – жесткость прибора правки.

Согласно полученных выше зависимостей, приборы правки точных БКС с широкими кругами должны иметь жесткость не ниже 1,8-2 кг/мкм.

Отмечено, что правка прибором пониженной жесткости отрицательно сказывается на работоспособности станка (увеличивается дисбаланс шлифовального круга, повышается амплитуда взаимных колебаний шлифовальной и ведущей бабок и т.д.).

Проводилось исследование равномерности продольных перемещений каретки с пинолью в условиях граничного трения по направляющим скольжения для определения критической скорости. При ее превышении движение осуществляется равномерно, при уменьшении – движение становится прерывистым со скачками и остановками. В работе приведено преобразование формулы для расчета критической скорости, выведенной В.Э. Пушем, применительно к продольной подаче прибора правки (в мм/об шл.круга):

$$S = \frac{9810\Delta f}{n\sqrt{4\pi\theta_3}}\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (6)$$

где Δf – разность коэффициентов трения покоя и движения при граничном трении; n – число оборотов шлифовального круга, мин; θ_3 – коэффициент затухания; k – жесткость привода; m – масса передвигаемого узла.

Согласно формуле (6), произведен расчет критической скорости для прибора правки БКС мод. 6С137А. Получено $S_{крит}$ = 0,0153 мм/об или $V_{крит.}$ = 16,8 мм/мин.

Экспериментальное определение критической скорости производилось путем записи индуктивным датчиком в координатах «путь – время» скорости перемещения каретки прибора правки. Шпиндель индуктивного датчика устанавливался с натягом в корпус каретки. Изменение скорости продольного перемещения производилось гидравлическим дросселем в диапазоне 12-50 мм/мин. Неравномерности продольного перемещения в указанном диапазоне не наблюдалось.

Следовательно, конструкция прибора правки, выполненная с направляющими скольжения для движения каретки, обеспечивает равномерность продольных перемещений в диапазоне скоростей, применяемых при «тонкой» правке.

В процессе правки шлифовального круга происходит выделение тепла, часть из которого поступает в державку, вызывая ее нагрев и удлинение. Для определения величины удлинения державки принят метод измерения средней (интегральной) температуры ее нагрева в процессе правки с последующим пересчетом. Принимаем ось оправки за ось абсцисс, приращение температуры оправки U будет являться функцией координаты x и времени t. Термические коэффициенты считаем независимыми от координат и времени. Уравнение теплового

баланса имеет следующие допущения: державка является стержнем конечной длины и постоянного диаметра; в связи с малостью диаметра и значительным временем действия теплового источника в каждый момент времени температура всех точек по длине и поперечному сечению стержня одинакова; на конце стержня помещен источник, соответствующий диаметру державки; принято, что все тепло остается державке, не распространяясь в корпусе прибора правки. Теплообмен с окружающей средой происходит по наружной поверхности стержня в результате контакта с охлаждающей жидкостью.

Формула для расчета удлинения державки Δl имеет вид:

$$\Delta l = U\alpha l' . \qquad (7)$$

где l' – длина державки при начальной температуре, мм; U – среднее приращение температуры державки за время правки круга, град.; α – коэффициент линейного расширения материала державки, град$^{-1}$.

Для экспериментальной проверки теоретических положений производилось измерение температуры с помощью термопары хромель–копель. Рабочий конец термопары припаивался к державке и изолировался от попадания охлаждающей жидкости. Свободные концы подводились к клеммам электронного автоматического потенциометра типа ЭПП-09М1. На БКС мод.МЕ397С1 был оборудован специальный стенд с возможностью контроля количества охлаждающей жидкости, подаваемой при правке; величин продольных ходов каретки прибора правки и подачи алмаза и т.д.

За время экспериментов было проведено ~ 1000 правок шлифовального круга 500×540×305 ЭБ 40СМ1К, использовано 6 алмазов весом 0,8–1 карат.

В результате работы установлено:

1. При правке шлифовального круга на БКС мод. МЕ397С1 с режимами: съем абразива 0,03 мм/ход; скорость продольного перемещения 200 мм/мин; подача охлаждающей жидкости 2,5 л/мин, приращение температуры нагрева державки достигало 110–120°С при наличии на алмазе в 1 карат площадки износа не более 2 мм^2. Установка алмаза производилась без его предварительной ориентации.

2. Увеличение глубины съема абразива (с 0,01 до 0,05 мм на ход) при прочих постоянных режимах правки повышает среднюю температуру нагрева державки (коэффициент корреляции 0,79).

3. Увеличение скорости продольной подачи алмаза при правке с 0,075 до 0,373 мм/об.шл.кр. при прочих постоянных режимах повышает среднюю температуру нагрева державки. Зависимость эта для острого и притупленного алмаза сохраняется при изменениях абсолютных значений температуры нагрева (коэффициенты корреляции соответственно равны 0,87 и 0,76).

4. За ход каретки прибора правки вне зависимости от состояния алмаза нагрев державки происходит на первых 30-60 мм круга (в зависимости от скорости продольного перемещения каретки и абсолютной температуры нагрева державки), затем температура стабилизируется и сохраняется до конца правки.

5. По мере затупления алмаза средняя температура нагрева державки при правке увеличивается.

6. Увеличение подачи охлаждающей жидкости до 6 л/мин при прочих постоянных режимах правки значительно снижает среднюю температуру нагрева державки.

В главе 3 приведены методики и исследования автоматизации процесса правки на БКС-автоматах.

В работе исследованы системы автоматического подвода алмаза к кругу для начала процесса правки. Между двумя последовательными правками основными факторами, действующими в системе «прибор правки – шлифовальный круг», являются износ кругов и правящего инструмента во время предыдущей правки, силовые и тепловые деформации. Влияние первых трех факторов (взятое по литературным источникам) не является постоянным; тепловые деформации – исследовались в работе. В качестве стенда для исследования автоматического подвода алмаза использовался БКС мод.МЕ397С1. Оценивалось смещение шпинделя шлифовального круга относительно суппорта ножа и взаимное смещение его и каретки прибора правки. Тепловые деформации шпинделя шлифовального круга стабилизируются на протяжении 2 часов, в то время как взаимное смещение относительно пиноли прибора правки не стабилизировалось за исследуемый промежуток времени (5 час.). Смещение пиноли относительно шпинделя достигло 20 мкм.

Результат влияния износа шлифовального круга и алмаза, тепловых и силовых деформаций на взаимное положение круга и правящего инструмента носит случайный характер и зависит от величины и интенсивности указанных выше факторов, каждый из которых является случайной величиной. Следовательно, расстояние от правящего инструмента до круга не остается постоянной величиной.

Были исследованы два метода подвода алмаза.

1. Для исследования точности подвода алмаза с помощью бесконтактной (пневматической) системы БКС мод.МЕ397С1 был оборудован специальный стенд. На пиноли прибора правки шлифовального круга рядом с алмазом устанавливалось пневматическое измерительное сопло, по которому осуществлялся подвод к кругу. Расстояние между кругом и соплом устанавливалось настройкой одноконтактного мембранного датчика типа БВ-Н808. Проводился многократный подвод пиноли с алмазом по соплу к шлифовальному кругу в одном положении без правки. При отсутствии охлаждения

система работала стабильно; при его включении – изменение расхода охлаждающей жидкости существенно влияло на точность подвода алмаза.

Для определения стабильности работы системы были проведены четыре серии опытов в автоматическом цикле без шлифования (правка за правкой). Математическая обработка данных и сравнение теоретической и экспериментальной кривых распределения осуществлялась методом среднего квадратичного отклонения частот путем построения доверительных пределов $\pm 2\sqrt{m_э}$, где $m_э$ – частота, позволила считать ряд распределения нормальным. Однако ряд значений выходят за вычисленные доверительные границы при 95%-ной надежности. Следовательно, подвод алмаза с помощью бесконтактной пневматической системы нельзя рекомендовать к применению.

2. Эффективность применения дозированной подачи алмаза определяется выбором ее оптимальной величины, обеспечивающей компенсацию действия указанных выше факторов в системе «шлифовальный круг – прибор правки», так как точность подвода самого механизма не превышает его кинематических погрешностей. Выбор величины подачи алмаза производился расчетным методом: постоянные величины (систематическая составляющая) складывается алгебраически, а случайные – геометрически.

Глубина съема абразива при правке для данных условий шлифования есть величина постоянная, остальные величины: размерный износ шлифовального круга и алмаза, тепловые и силовые деформации, кинематические погрешности прибора правки, как зависящие от большого числа различных факторов, в общем случае носят случайный характер. В процессе шлифования и правки проявляется суммарное влияние этих факторов, которое также носит случайный характер.

В качестве меры величины случайной составляющей подачи алмаза принимается дисперсия D (Δ_a) погрешности Δ_a. Дисперсия суммы нескольких независимых случайных величин равна сумме дисперсий этих величин. В случае суммирования составляющих погрешностей с различными законами распределения вводятся соответствующие коэффициенты.

Величина дозированной подачи алмаза определяется:

$$\Delta_a = \Delta C + t''\sqrt{\lambda_1\delta^2(\Delta C'_1) + \lambda_2\delta^2(\Delta C'_2) + \lambda_3\delta^2(\Delta C_3) + \ldots + \lambda_5\delta^2(\Delta C_5)}, \quad (8)$$

где ΔC – оптимальная величина съема абразива при правке, мкм; $\Delta C'_1$ – максимальный износ шлифовального круга между двумя правками, мкм; $\Delta C'_2$ – результирующее влияние тепловых деформаций в системе

«шлифовальный круг – прибор правки», мкм; ΔC_3 – максимальный износ алмаза за правку, мкм; ΔC_4 – приведенная погрешность перемещения пиноли прибора правки, связанная с ошибками кинематической цепи, мкм; ΔC_5 – силовые деформации в системе «шлифовальный круг – прибор правки», мкм; t'' – коэффициент, определяющий процент риска получения брака при обработке; λ_1, λ_2, λ_3, λ_4, λ_5 – коэффициенты, зависящие от формы кривых распределения.

Для случая износа инструмента (шлифовальный круг и алмаз) и тепловых деформаций принимается распределение равной вероятности $\lambda = 1/3$; ошибки выполнения настроечных размеров за счет ошибок кинематической цепи механизма подачи алмаза и ошибки, связанные с отжимом в процессе правки, подчиняются закону нормального распределения или закону, по характеру, близкому к нему, в этом случае $\lambda = 1/9$; $\delta(\Delta C'_1),\ldots, \delta(\Delta C_5)$ – стандартное отклонение поля рассеивания погрешности от действия соответствующего фактора. Величина $\delta(\Delta C_n)$ для каждого конкретного случая получается в результате обработки опытно-статистических данных.

По проведенным расчетам величина дозированной подачи алмаза для БКС мод.6С137 – 35÷40 мкм, съем абразива при проходе – 25 мкм. Опыт эксплуатации БКС мод.6С137 показал, что величина дозированной подачи принята 30–45 мкм.

В работе исследованы системы автоматического выхода на размер шлифованных деталей после правки: с путевым управляющим устройством – электрочувствительным упором и размерным управляющим устройством – реле прироста тока.

Компенсация размерного износа шлифовального круга после правки, основанная на равной подаче алмаза, производящего правку, и исполнительного органа станка, дает значительный разброс размеров шлифованных деталей за счет износа алмаза, тепловых и силовых деформаций в системе, ошибок в перемещениях исполнительных органов. Для уменьшения этих погрешностей вводится рассогласование величины подачи алмаза на правку и шлифовального круга после правки. Это рассогласование основано на том, что уменьшение размера шлифовального круга при правке компенсируется неполностью, с тем, чтобы накопленный остаток компенсировался путем подналадки от измерительного прибора.

Величина рассогласования находится путем сложения дисперсий составляющих погрешностей указанных выше случайных величин и определения среднеквадратичного отклонения:

$$\Delta\Sigma = t''\sqrt{\lambda_1\delta^2(\Delta_1)+\ldots+\lambda_6\delta^2(\Delta_6)}, \qquad (9)$$

где t'' – коэффициент, определяющий процент риска получения брака при обработке; λ_1, ..., λ_6 – коэффициенты, зависящие от формы кривых

распределения; $\delta(\Delta_1)$,... $\delta(\Delta_6)$ – стандартное отклонение поля рассеивания погрешности от действия соответствующего фактора системы «шлифовальный круг – алмаз – прибор правки» и «БКС – шлифовальный круг – обработанная деталь»; ошибки подачи алмаза и бабки шлифовального круга, отнесенные к перемещению круга; от силовых деформаций в системе «шлифовальный круг – прибор правки».

Величина рассогласования подачи шлифовального круга после правки и алмаза для БКС мод.6С137, рассчитанная по формуле (9), равна 8,5 мкм.

На автомате мод.6С137 с управляющим устройством – электрочувствительным упором и контрольным прибором – измерительно-подналадочным устройством ОКБ-1111 были отшлифованы беговые дорожки внутренних колец роликоподшипников у двух партий при одинаковых режимах обработки: в первом случае – без рассогласования, во втором – с рассогласованием. Их сравнение показало, что благодаря рациональной настройке станка поле рассеивания размеров значительно сокращается. Опыт годовой эксплуатации БКС мод.6С137 показал, что величина рассогласования 5 – 9 мкм обеспечивает изготовление колец с заданным допуском (0,03 мм).

Анализируя приведенную в работе точечную диаграмму, обращает на себя внимание резко выраженный синусоидальный характер изменения размеров колец. Установлено, что это связано с положением винта подачи электрочувствительного упора. Проведенные исследования точности работы электрочувствительного упора показали:

1. Вариации ошибки соответствия перемещения винта упора и шлифовальной бабки не превышают 3 мкм.

2. Вариации осевого перемещения винта упора при повороте храпового колеса вручную на один зуб не превышают 5 мкм с учетом передаточного отношения на круг ≈ 2 мкм. График осевого перемещения винта при повороте храпового колеса на 10 зубьев не имеет характерных признаков, свойственных точечной диаграмме.

3. Радиальное биение винта упора соответствует характеру перемещения шлифовальной бабки с учетом передаточного отношения.

Следовательно, причиной разброса размера при шлифовании с путевым управляющим устройством является радиальное биение винта упора. В работе приведены недостатки конструкции электрочувствительного упора, устранение которых позволит повысить точность работы БКС.

В качестве размерного управляющего устройства в работе исследовалась точность выхода на размер после правки по реле прироста тока, катушка которого включена через трансформатор в цепь статора электродвигателя привода главного движения.

Для оценки точности выхода на размер после правки проводилось массовое шлифование наружных колец шариковых подшипников № 210 на БКС мод.6С133. Команда на правку подавалась наладчиком, цикл правки и выход на размер автоматизированы. Измерение обработанных колец (партия 3 шт.) проводилось на приборе Д-312, снабженном микатором с ценой деления 2 мкм. Обработка полученных результатов методами математической статистики позволила установить, что показатель точности процесса меньше единицы. В системе имеется недостаток точности, который приводит к появлению брака после правки: при условии нормального распределения вероятный брак «+» достигает 3%.

Следовательно, реле прироста тока может быть рекомендовано в системе выхода на размер после правки на БКС.

После проведения правки в системе автоматического регулирования «БКС – контрольный автомат» предлагается ввести рассогласование, которое в дальнейшем устраняется командой на подналадку.

В первый период после правки (~ 10 мин) происходит повышенный износ шлифовального круга, требующий более частой подналадки. Для определения скорости подналадки предложена формула:

$$V_{П} = \frac{TK}{t}, \qquad (10)$$

где T – величина подналадочного импульса; K – количество подналадок на рассматриваемом отрезке времени работы станка; t – настроечное время между соседними подналадками.

При исследовании работы БКС мод.6С133 установлено, что $V_П \neq const$, скорость подналадки в первый период (~ 10 мин) : $V_{П_{max}} = 3$ мкм/мин, остальное время работы станка : $V_{П_{норм}} = 0.5$ мкм/мин. Регулирование скорости подналадки может производиться за счет изменения величины импульса подналадки или времени выдержки между соседними подналадками.

В главе 4 рассмотрена ожидаемая экономическая эффективность автоматизации процесса правки БКС с широкими кругами. Анализ проведен для случая использования БКС в составе автоматических линий массового производства. За счет автоматизации правки по данным НИИАЛМАЗа и НИИБТН снижается расход абразива и правящих средств, происходит сокращение времени технического обслуживания и, следовательно, снижается себестоимость получаемой продукции. Выполненные расчеты по фактическим затратам в ОАО «Московский подшипник. (ГПЗ-1)» для выпуска продукции с автоматической линии 1-2 млн. колец в год показал, что автоматизация процесса правки эффективна во всем диапазоне программы выпуска. С ростом выпуска

продукции эффективность автоматизации растет. Для программы выпуска 1,7 млн. колец в год срок окупаемости составляет 0,73 года.

С увеличением ширины круга эффективность автоматизации правки шлифовального круга на БКС увеличивается. При ширине кругов > 300 мм автоматизацию правки следует рекомендовать для внедрения в промышленность.

В главе 5 приведены практические приложения результатов исследований. В результате проведенных исследований разработано техническое задание на новую конструкцию прибора правки, обеспечивающего автоматизацию процесса, в котором учтены результаты работы. Предложена модернизация приборов правки (изменение копирной системы, системы охлаждения алмаза и т.д.). Разработан метод контроля подачи охлаждающей жидкости при правке кругов на БКС по величине нагрева державки с алмазом, позволяющий при ее отсутствии прекращать процесс правки. Разработаны и предложены ОАО «Московский завод автоматических линий и специальных станков» стенды для комплексной проверки качества изготовления и сборки приборов правки. Благодаря внедрению этих стендов реальная жесткость приборов правки может быть повышена в среднем на 30-50%.

В результате проведенных исследований разработаны предложения о включении в действующий ГОСТ Р на БКС регламентации следующих параметров: жесткость приборов правки по трем осям, точность копирования приборов правки и вариация положения вершины правящего инструмента при прямом и обратном ходах, кинематическая точность приборов правки. Указанные предложения переданы в Госстандарт РФ.

Установленные требования к техническим характеристикам приборов правки и средствам автоматизации процесса могут быть использованы для сертификации продукции.

Общие выводы.

1. БКС с широкими кругами относятся к традиционным конструкциям, которые были изучены в 70-80-е гг. Существенным является создание в 90-е гг. БКС с ЧПУ типа CNC, что оказало существенное влияние на конструкции ряда узлов, в т.ч. приборов правки. Однако, опыт эксплуатации БКС с ЧПУ показал их эффективность в условиях серийного производства, где выполняются частые переналадки. В условиях массового производства изделий БКС с широкими кругами управляются от программируемых контроллеров и, следовательно, принципиально их узлы не изменились, в т.ч. приборы правки.

Агрегатно-модульный принцип построения БКС позволил создать типовые конструкции основных узлов (механизмов подач, шпиндельных узлов, приборов правки и др.), которые в последние десятилетия конструктивно совершенствуются. Несмотря на значительные успехи в

1176786

разработке научных основ правки абразивных кругов они еще далеки от завершения. В первую очередь, не сформулированы научно-обоснованные требования к приборам правки и не создана комплексная автоматизация процесса в условиях массового производства.

Комплексная автоматизация процесса правки на БКС, встроенных в автоматические линии, позволит повысить их производительность и качество обработки.

2. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что качество бесцентрового шлифования широкими кругами и правки зависят от конструкции и состояния приборов правки. Разработаны общие рекомендации по созданию приборов правки, обеспечивающие стабильность характеристик и, следовательно, возможность автоматизации:

- Благодаря кинематическим погрешностям прибора правки возникают ошибки подачи алмаза, равные ±4% от общей величины его подачи при вариации отдельных значений до 7 мкм. Наибольшее влияние на точность оказывают конечные звенья механизма подачи алмаза. Для повышения точности перемещения алмаза следует нормировать их погрешности.

- При многократном повторении ходов в копирной системе прибора правки нестабильность копирования с надежностью в 95% не должна превышать 2,5 мкм при вариации отдельных значений до 5 мкм, нестабильность воспроизведения формы копира при прямом и обратном ходах не должна превышать погрешности общей нестабильности копирной системы; изменение скорости продольного перемещения прибора правки в диапазоне 100-400 мм/мин не должно влиять на стабильность работы копирной системы.

- Сила замыкания в копирной системе прибора правки должна выбираться по выведенной формуле, учитывающей график изменения сил, действующих на ведомое звено, и сил инерции, определяемых по заданному закону движения ведомого звена с учетом его упругости.

- Приборы правки должны иметь жесткость не ниже 1,8-2 кг/мкм. Установлена зависимость качества шлифования (отклонение от круглости, волнистости профиля и осевого сечения) от жесткости прибора правки.

- При скорости продольного перемещения прибора правки 12 мм/мин и выше его движение равномерное, остановок и срывов не наблюдалось.

- Нагрев державки с алмазом при правке зависит от режимов правки, износа алмаза, размеров и материала державки, количества подаваемой СОЖ. Время нагрева державки зависит от количества подводимого тепла, ее размеров и материала. Нагрев державки происходит на первых 30-60 мм ширины круга, затем температура стабилизируется и сохраняется до конца правки. В качестве материала

державки рекомендуется использовать инвар и др. материалы, имеющие минимальный коэффициент линейного расширения.

3. Для контроля качества изготовления и сборки приборов правки рекомендуется внести в ГОСТ 13510-92 «Станки бесцентрово-шлифовальные. Основные перемещения и размеры. Нормы точности» следующие дополнительные требования:

- нормирование жесткости приборов правки шлифовального и ведущего кругов;
- нормирование точности копирных систем приборов правки;
- нормирование кинематической точности подачи алмаза в приборах правки.

Рекомендации по выбору ряда других параметров: динамическая характеристика копирной системы, тепловые деформации прибора должны быть учтены при проектировании новых конструкций или модернизации действующего оборудования.

4. Комплексная система автоматизации процесса правки состоит из команды на правку, подвода алмаза к шлифовальному кругу, продольного перемещения прибора вдоль круга с подачей алмаза в крайних положениях, выхода на размер после правки при обеспечении стабильной работы БКС-автомата и прибора активного контроля.

Скорость продольного перемещения прибора правки и величина съема абразива при проходах рекомендованы ГОСТом Р, команда на правку определяется по реле времени.

5. Для автоматизации подвода алмаза к шлифовальному кругу установлено:

- бесконтактный способ контроля положения алмаза относительно шлифовального круга с помощью пневматической системы, ошибка подвода достигает 30% от величины съема абразива и зависит от изменения количества СОЖ, подаваемой при правке;
- при дозированной подаче алмаза на постоянную величину ошибка подвода не превышает кинематических погрешностей прибора правки. В работе выведена формула для определения рациональной величины подачи алмаза. Система дозированной подачи алмаза отличается простотой конструкции и рекомендуется для автоматического цикла правки.

6. Для автоматизации выхода на размер после правки шлифовального круга предлагается рассогласование величины подачи шлифовального круга (после правки) и алмаза (на правку). Накопленная погрешность компенсируется путем подналадок от измерительного прибора, с которым работает станок. Выведена формула для определения величины рассогласования подачи круга и алмаза. Разработаны рекомендации по повышению точности путевого управляющего устройства – электрочувствительного упора – в системе выхода на размер после правки.

7. Для обеспечения надежной совместной работы после правки БКС и контрольного автомата необходимо предусмотреть два режима подналадки: ускоренная на первый период работы станка после правки (~ 10 мин) и нормальная.

8. Автоматизация процесса правки шлифовального круга снижает себестоимость продукции за счет сокращения затрат на абразив и правящие средства, повышения качества продукции и увеличения отдачи со станка.

9. Результаты исследовательской работы являются основанием для модернизации существующих и создания новых конструкций приборов правки БКС. Они переданы на заводы, изготавливающие и эксплуатирующие указанные станки, а также в ГОССТАНДАРТ РФ.

10. Установленные требования к техническим характеристикам приборов правки и средствам автоматизации процесса могут быть использованы для возможности сертификации продукции – БКС с широкими кругами.

Список публикаций

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Ашкиназий Я.М. Исследования приборов правки бесцентровых круглошлифовальных станков // Новые технологии. – 1999. – № 6. – С.21-29.

2. Ашкиназий Я.М. Комплексная система автоматизации процесса правки на бесцентровых круглошлифовальных станках // Приводная техника. – 1999. – № 11/12 (22). – С.34-38.

3. Ашкиназий Я.М. Приборы правки бесцентровых круглошлифовальных станков // Приводная техника. – 2000. – № 1 (23). – С.36-43.

Принято к публикации:

Ашкиназий Я.М. Повышение производительности автоматических линий из бесцентровых круглошлифовальных станков. // Проектирование технологических машин. – (М.) – 2000. – Вып. 20. – С.4-11 (в печати).