

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.91.01/02

ХМЕЛЬНИЦКИЙ
Руслан Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЯ СКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НЕПОЛНЫХ
СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
ВРАЩАЮЩИМСЯ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2018

Научная работа выполнена в учреждении образования «Полоцкий государственный университет».

Научный
руководитель

ПОПОК Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Технология и оборудование машиностро-
ительного производства» учреждения образования
«Полоцкий государственный университет»

Официальные
оппоненты:

ДАНИЛОВ Виктор Алексеевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»
Белорусского национального технического университета;

ЛЕБЕДЕВ Владимир Яковлевич,
кандидат технических наук, заведующий лабораторией
физики поверхностных явлений ГНУ «Физико-
технический институт НАН Беларуси»

Оппонирующая
организация

ГУВПО «Белорусско-Российский университет»

Защита состоится 27 апреля 2018 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 23 марта 2018 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.03
доктор технических наук, профессор

О. Г. Девойно

© Хмельницкий Р.С., 2018
© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

В технике широко применяются детали с неполными сферическими поверхностями, такие как шаровой палец опоры автомобиля, шаровая заглушка запорной арматуры, шар рукоятки переключения механизмов машин и другие. Эти детали отличаются габаритами, предъявляемыми к ним требованиями по точности, качеству и надежности. Для их изготовления используются различные методы формообразования – литьё, давление, порошковая металлургия и резание. С целью повышения качества и точности получения сферических поверхностей чаще всего применяется резание, включающее как лезвийную, так и абразивную обработку.

В настоящее время зарубежные и отечественные производители стремятся исключить абразивную обработку из технологических процессов получения деталей и заменить её высокоскоростной лезвийной обработкой. Однако высокоскоростная обработка требует применения дорогостоящих приводов и шпинделей станков, специальных инструментальных материалов и покрытий, не позволяет использовать режущие инструменты большого диаметра из-за снижения мощности высокоскоростного привода. В этой связи представляет практический интерес использование возможностей широко применяемых в машиностроительном производстве универсальных шлифовальных и заточных станков, оснащенных приводами с частотой вращения 3 000 мин⁻¹ и более, для скоростной обработки лезвийными режущими инструментами, в частности вращающимися, оснащенными стандартными режущими пластинами. Применительно к получению неполных (ограниченных плоскостями с одной или двух сторон) наружных сферических поверхностей деталей может быть реализована комбинированная лезвийная обработка, при которой результирующее движение резания обеспечивается на основе вращения инструмента и детали и циклического поступательного их перемещения. Комбинированная обработка на высокой скорости резания (более 200 м/мин) имеет кинематические, физические и технологические особенности, которые, несмотря на проведенные ранее исследования К. Саломона, В. Рейхеля, В.Д. Кузнецова, Х. Шульца, В.Ф. Боброва, А.Д. Макарова и других, изучены не в достаточной мере.

В связи с этим исследование комбинированной лезвийной обработки неполных сферических поверхностей деталей с высокими скоростями резания и разработка технологии и оснастки для её реализации, обеспечивающие требуемые показатели качества и точности обработанной поверхности при высокой производительности, являются актуальными. Результаты этих исследований создадут предпосылки и позволят выработать рекомендации по применению комбинированной скоростной обработки сферических поверхностей деталей не только на универсальном оборудовании, но и на станках с ЧПУ, оснащенных высокоскоростными приводами и шпинделями.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Технология и оборудование машиностроительного производства» учреждения образования «Полоцкий государственный университет» и соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. п. 3 «Промыш-

ленные и строительные технологии и производство: высокоскоростные, высокоточные станки и инструменты», утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 № 166.

Работа выполнена в рамках: гранта Министерства образования Республики Беларусь по теме «Совершенствование технологии формообразования сферических поверхностей деталей на основе исследования кинематико-геометрических и физических характеристик процесса резания многофункциональными режущими инструментами» (отчет о НИР № ГР 20090528), 2009; гранта Министерства образования Республики Беларусь по теме «Исследование влияния параметров и характеристик процесса высокоскоростного фрезерования на качество и точность сферических поверхностей деталей» (отчет о НИР № ГР 20112372), 2011; задания СИ 4.42 «Разработать конструкцию и организовать производство гаммы блочно-модульных режущих инструментов» подпрограмма «Станки и инструменты» ГНТП «Машиностроение» (отчет о НИР № ГР 20053622), 2005–2006; НИР ГБ 5211 «Разработка научных основ и методологии проектирования технологий и оборудования мобильного машиностроительного производства», 2011–2015; НИР «Научные и технологические основы создания высокоскоростных и высокоточных процессов, станков и инструментов для обработки материалов с заданными свойствами», 2016–2020.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработать технологию скоростной обработки неполных сферических поверхностей деталей машин вращающимся лезвийным инструментом, обеспечивающей повышение производительности и качества обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать известные методы и способы получения сферических поверхностей деталей, результаты исследований скоростной обработки материалов, выявить их преимущества и недостатки в части обеспечения требуемых параметров качества и точности;
- разработать математические модели, позволяющие определить кинематические и геометрические параметры процесса скоростного резания сферических поверхностей;
- изучить влияние кинематико-геометрических параметров процесса скоростного резания на качество обработки сферических поверхностей;
- провести экспериментальные исследования и установить влияние режимов резания сферических поверхностей на динамические и тепловые характеристики процесса резания, а также на изнашивание инструмента, микрорельеф и точность формы обработанной поверхности сферы;
- сравнить полученные результаты при скоростной лезвийной обработке с данными при обработке сферических поверхностей на токарном станке с ЧПУ;
- разработать технологию, спроектировать и изготовить технологическую оснастку, модернизировать универсальный станок для обработки неполных сферических поверхностей деталей машин на высоких скоростях резания.

Научная новизна

1. Теоретически обоснованы кинематические схемы скоростной лезвийной обработки сферических поверхностей на основе вращения многолезвийного инструмента и детали и относительного их поступательного перемещения, включающие трёх- и двухэлементные схемы резания на переходах врезания, выглаживания и

выхаживания, а также соотношение частот вращения детали и инструмента, что позволяет обеспечить минимальные (в пределах $0,25 \div 1,0$ градуса) изменения кинематических передних и задних углов лезвия режущего инструмента и формирование регулярного микрорельефа со значением параметра шероховатости поверхности $Rz 2,0 \div 6,3$ мкм.

2. Экспериментально установлена цикличность изменения параметров процесса резания на переходах врезания, выхаживания и выглаживания операции скоростной обработки неполных сферических поверхностей деталей вращающимся лезвийным инструментом, что позволило определить диапазон режимов резания, обеспечивающий образование мелкодроблёной стружки, минимальные значения деформации срезаемого слоя, мощности и силы резания, вибрации и теплоты.

3. Экспериментально доказаны технологические возможности скоростной обработки вращающимся твёрдосплавным лезвийным инструментом со скоростью $400 \div 600$ м/мин заготовки из конструкционной углеродистой стали с окружной скоростью до 20 м/мин и поперечной подачей до 6 мм/мин, обеспечивающие достижение параметров точности и шероховатости сферических поверхностей деталей, сопоставимых со шлифованными поверхностями.

4. Предложены рациональная форма и геометрия режущего лезвия инструмента (криволинейный участок режущей кромки с радиусом обрабатываемой сферы и фаской по задней поверхности высотой $0,1 \div 0,4$ мм и длиной $2 \div 4$ мм, вспомогательным $1 \div 5$ и главным $67 \div 74$ градусов углами в плане), учитывающие угловое расположение и перемещения инструмента и заготовки относительно друг друга, а также форму и величину износа режущих кромок, что обеспечивает работоспособное состояние режущего инструмента с заданными стойкостью и качеством обработки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели взаимосвязи окружных скоростей инструмента и заготовки, угла установки инструмента относительно детали, размеров детали и геометрии лезвий инструментов, которые позволили определять рациональные значения этих параметров резания исходя из заданного параметра шероховатости Rz сферической поверхности и управлять процессом резания.

2. Экспериментально установленные зависимости показателей усадки стружки и относительного сдвига, силы и мощности резания, вибрации, температуры детали на переходах врезания, выхаживания и выглаживания операции скоростной обработки от времени и режимов резания, которые позволяют выбрать рациональные диапазоны изменения окружных скоростей инструмента и заготовки и поперечной подачи, обеспечивающих образование мелкодроблёной стружки, минимальные значения показателей деформации, силы резания, потребляемой мощности и температуры нагрева поверхности детали при допустимых значениях вибрации и получение заданных значений параметров шероховатости поверхности и точности сферы.

3. Результаты экспериментальных исследований кинетики износа лезвия вращающегося инструмента, включающие определение изменений формы и размеров фаски износа режущей кромки от времени обработки и режима резания, которые позволили предложить предельные размеры фаски и криволинейного участка режущей кромки, рациональный диапазон значений вспомогательного и главного углов в плане, обеспечивающие заданные параметры по точности и шероховатости поверхности сферы.

4. Экспериментально полученные результаты исследования влияния геометрических параметров установки, соотношения частот вращения инструмента и заготовки и относительной скорости циклического поступательного их перемещения на микрорельеф, микротвёрдость и точность обработанной сферической поверхности, позволившие установить рациональные значения режима чистовой лезвийной обработки, обеспечивающих уровень параметров качества обработки, сопоставимых со шлифованными поверхностями.

5. Результаты исследований обработки сферических поверхностей деталей на токарном станке с ЧПУ, включающие определение влияния режимов резания на температуру, шероховатость, микротвёрдость обработанной поверхности и производительность обработки, что позволило установить преимущество скоростной обработки неполных сферических поверхностей вращающимся лезвийным инструментом по сравнению с обработкой на станках с ЧПУ.

Личный вклад соискателя ученой степени

Изложенные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований получены как самим соискателем, так и при участии соавторов. Совместно с И.П. Кунцевич разрабатывались математические модели кинематических и геометрических характеристик процесса резания, с В.С. Анисимовым проводились экспериментальные исследования физических и технологических характеристик процесса резания неполных сферических поверхностей детали.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Представленные в диссертационной работе результаты доложены и обсуждены на научных мероприятиях, таких как: Международная научно-техническая конференция: «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилёв, 2006, 2017); Международная научно-техническая конференция «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» (г. Новополоцк, 2009); Международная научно-техническая конференция «Машиностроение: технологии-оборудование-инструмент-качество» (г. Минск, 2010, 2014 и 2016); Международная научно-техническая конференция Junior researchers' conference (Novopolotsk, 2010, 2016, 2017); Международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических процессов» (г. Минск, 2011); Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в машиностроении» (г. Новополоцк, 2011); Международная научно-техническая конференция «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (г. Минск, 2013, 2015, 2017); III Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (г. Минск, 2015); 13-я Международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике» (68-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) (г. Минск, 2015); XI Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 2016); Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (г. Витебск, 2017).

Опубликование результатов диссертаций

По материалам диссертации опубликовано 45 работ, включая 8 статей в научно-технических журналах, включённых в перечень ВАК Республики Беларусь для

опубликования результатов диссертационных исследований, общим объемом 6 авторских листов, а также 23 статьи и 11 тезисов докладов в сборниках материалов научных конференций. Получено 3 патента Республики Беларусь, из них 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Объем диссертации составляет 199 страниц. Работа содержит 83 рисунка, 15 таблиц, библиографический список, содержащий 124 источника, включая список публикаций соискателя 45 наименований на 12 страницах, 6 приложений на 51 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены номенклатура деталей со сферическими поверхностями и предъявляемые к ним требования по качеству и точности. Выделены детали с неполными сферическими поверхностями, имеющими шероховатость от $Rz\ 40$ до $Ra\ 0,4$ мкм и точность с 16 по 6 квалитет ISO. Проанализированы основные методы и способы получения деталей со сферическими поверхностями. Для относительно неточных поверхностей (16–12 квалитет) и шероховатостью $Rz\ 40\div 20$ мкм рассмотрены возможности их получения с применением различных методов литья, обработки давлением, порошковой металлургии, в том числе на заготовительных операциях. Подробно рассмотрены способы механической обработки резанием неполных сферических поверхностей деталей как наиболее перспективные с точки зрения качества и точности получения изделия. Определены высокопроизводительные и высокоточные способы резания, реализуемые при вращении обрабатываемой заготовки и инструмента. Показаны преимущества лезвийной обработки по сравнению с абразивной. Установлены основные технологические и конструктивные параметры для реализации этих способов.

Проанализированы результаты исследований по кинематике и механике резания, тепловым явлениям, изнашиванию режущих инструментов при обработке поверхностей сфер резанием, достигаемым параметрам шероховатости и точности обработанных поверхностей. В исследованиях отмечаются особенности резания сфер, связанные с кривизной обрабатываемой поверхности, повышенными требованиями к вибрации, точности и качеству обработки, удалению стружки и теплоотводу из зоны резания. Вместе с тем недостаточно внимания уделено кинематическим особенностям обработки сфер вращающимися инструментами. Выявлены особенности и преимущества применения высокоскоростного резания для получения сфер: необходимо учитывать уменьшение объема деформируемого и срезаемого материала, преимущественный теплоотвод в стружку, исключение вибрации при резании, повышенный износ лезвия инструмента. В литературе отмечается необходимость рационального подхода к выбору режима высокоскоростного резания. Зачастую экономически целесообразно обрабатывать заготовки лезвийными инструментами в диапазоне скоростей резания не превышающем 1000 м/мин. Поэтому требуются дополнительные исследования кинематических, физических и технологических

особенностей скоростной лезвийной обработки сферических поверхностей вращающимися инструментами.

На основе анализа литературных источников определены объекты и направления исследований в данной диссертации.

Во второй главе описываются и анализируются возможные кинематические схемы резания, получаемые при этом соотношения окружных скоростей инструмента и заготовки и их влияние на шероховатость обработанной поверхности, геометрию лезвия инструмента и сечение срезаемого слоя в процессе резания.

Схема скоростной обработки неполной сферической поверхности детали представлена на рисунке 1. По этой схеме режущий инструмент 1 совершает главное вращательное движение D_r , а заготовка 2 диаметром $D_{сф}$ – вращательное движение подачи D_{se} . Заготовке также сообщается поступательное движение D_{sn} , которое обеспечивает врезание на заданную глубину резания. При этом режущие лезвия инструмента 1 настраиваются на диаметр D , а заготовка 2 устанавливается относительно инструмента под углом к оси вращения η . Для формирования сферы оси вращения заготовки и инструмента должны пересекаться. Схема установки обеспечивает получение неполной ограниченной с одной стороны сферической поверхности высотой H . Отличия данной схемы обработки сферической поверхности детали от известных состоят в последовательности снятия припуска, включающей этапы врезания, выхаживания и выглаживания с циклически изменяющимися значениями скоростей движений инструмента и заготовки, а также значением окружной скорости инструмента, превышающей традиционные (более 200 м/мин), и использование специального режущего инструмента, обеспечивающих реализацию комбинированной скоростной лезвийной обработки. Кинематическая схема резания при врезании вращающегося инструмента во вращающуюся заготовку является трёхэлементной (D_r , D_{se} , D_{sn}) и при выхаживании (выглаживании), когда прерывается поступательное движение D_{sn} , переходит в двухэлементную (D_r , D_{se}). Реализуется сложная траектория резания в виде циклоиды, навёрнутой на спираль или окружность, и пересекающей их.

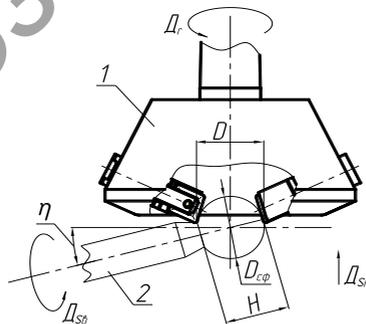


Рисунок 1. – Схема комбинированной скоростной обработки сферической поверхности детали

Обработка сферической поверхности описывается функцией, которая включает размеры заготовки $D_{сф}$ и инструмента с закругленной вершиной лезвия радиусом r ,

установочные параметры инструмента и заготовки η и H , параметр шероховатости поверхности Rz как одну из основных характеристик качества обрабатываемой поверхности, частоты вращения инструмента n_1 и заготовки n_2 , время контакта τ , то есть

$$F_i = f(D_{cf}, H, \eta, Rz, r, n_1, n_2, \tau). \quad (1)$$

Получены зависимости, устанавливающие функциональную связь параметров, в следующем виде:

– окружная скорость инструмента:

$$v_1 = \pi \cdot n_1 \cdot \sqrt{D_{cf} \cdot H}, \quad (2)$$

– окружная скорость заготовки:

$$v_2 = n_1 \cdot S_o \cdot \sin(2 \cdot \eta + 2(\pi - 2 \cdot \eta) \cdot n_1 \cdot \tau), \quad (3)$$

– подача на оборот:

$$S_o = \sqrt{\frac{-1 + \sqrt{1 + 64r^2 a^2}}{2a^2}}, \quad (4)$$

где
$$a = \frac{2r + R_{cf}}{2 \cdot R_{cf} \cdot Rz} = \frac{4r + D_{cf}}{2D_{cf} \cdot Rz}.$$

Проведены расчеты параметров обработки при заданных значениях высоты неровностей поверхности Rz , диаметра сферы D_{cf} , высоты H , радиуса округления вершины лезвия r , частоты вращения инструмента n_1 , которые позволили определить рациональные значения угла установки η ($17^\circ 11' \div 26^\circ 21'$), подачи S_o ($0,573 \div 0,696$ мм/об) и частоты вращения заготовки n_2 ($19,29 \div 45,99$ мин⁻¹), обеспечивающие получение заданного параметра шероховатости поверхности (Rz $2,0 \div 6,3$ мкм). Для обеспечения требуемого значения параметра Rz при обработке сфер с различными диаметрами необходимо изменять угол установки η и высоту сферической поверхности H , а также значение подачи S_o .

Получены формулы для расчета кинематических переднего γ_k и заднего α_k углов, углов в плане главного ϕ_k и вспомогательного ϕ_{kl} режущего лезвия инструмента, учитывающие изменения направления векторов окружных скоростей инструмента и заготовки в процессе резания. Например, для переднего угла лезвия эти формулы имеют следующий вид:

$$\gamma_k = \gamma_c + \sigma, \quad (5)$$

где $\arctg \cdot (\cos \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma_c) - \gamma_c < \sigma < \arctg \cdot \left(\frac{\operatorname{tg} \gamma_c}{\cos \varepsilon} \right) - \gamma_c$, если $\gamma_c > 0$,

или $\arctg \cdot \left(\frac{\operatorname{tg} \gamma_c}{\cos \varepsilon} \right) - \gamma_c < \sigma < \arctg \cdot (\cos \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma_c) - \gamma_c$, если $\gamma_c < 0$,

ε – угол, который образует вектор скорости \vec{v}_1 и результирующий вектор скорости \vec{v}_p в плоскости резания P_{nk} , находится по следующей формуле:

$$\cos \varepsilon(t) = \frac{v_1 + v_{2i} \cdot \sin \mu}{\sqrt{v_1^2 + v_{2i}^2 + 2 \cdot v_1 \cdot v_{2i} \cdot \sin \mu}},$$

μ – угол между вектором скорости \vec{v}_{2i} и осью $O_i Y_i$ в плоскости резания P_{nk} находится из уравнения:

$$\cos \mu(t) = \frac{\sin^2 \varphi \cdot \cos \eta - b \cdot \cos \varphi}{c \cdot \cos \eta},$$

η – угол наклона оси заготовки, который определяется по формуле

$$\eta = \arccos \left(\sqrt{\frac{H}{D_{сф}}} \right),$$

коэффициенты:

$$b = \frac{2 \cdot \cos^2(\eta + \delta) - \cos^2 \eta \cdot (1 - \cos \varphi)}{\cos \eta},$$

$$c = \sqrt{\sin^4 \varphi + b^2 \cdot (\operatorname{tg}^2 \eta + \cos^2 \varphi) + \sin^2 \eta \cdot \sin^2 \varphi \cdot (1 + \cos \varphi)^2 + 2 \cdot b \cdot \sin^2 \varphi \cdot (\operatorname{tg} \eta \cdot \sin \eta - \cos \varphi \cdot \cos \eta)},$$

углы:

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot \tau,$$

$$\delta = (\pi - 2 \cdot \eta) \cdot n_1 \cdot \tau,$$

γ_c – статический передний угол режущего лезвия инструмента.

Анализ формул в диапазоне изменения окружных скоростей заготовки (0÷25 м/мин) и инструмента (0÷1400 м/мин) показывает, что изменения значения углов γ_k и α_k находятся в пределах 0,25 градуса. Значения углов в плане φ_k и $\varphi_{k/}$ определяются изменением положения рабочей плоскости при переходе от этапа врезания к этапу выхаживания. Существенное влияние на изменение углов лезвия оказывает угол установки оси вращения инструмента относительно оси вращения обрабатываемой заготовки η , а также соотношение окружных скоростей инструмента и заготовки: чем больше это соотношение, тем больше изменение значений передних и задних углов. Расчётные и экспериментально подтверждённые значения углов лезвий представлены в главе 3.

В зависимости от формы используемых заготовок (сферическая, цилиндрическая, конусообразная) на этапах врезания, выхаживания и выглаживания изменяется форма сечения срезаемого слоя (криволинейный параллелограмм и трапеция). Получены формулы для расчёта параметров срезаемого слоя и производительности обработки.

В третьей главе рассмотрена методика и результаты экспериментальных исследований деформации срезаемого слоя, мощности и силы резания, вибрации, температуры детали и стружки, износа режущих лезвий, шероховатости и точности обработанной поверхности.

Для расширения технологических возможностей универсально-заточного станка модели 3М642 (рисунок 2) со шпиндельным узлом 8 проведена его модернизация путём оснащения приспособлениями для наружного круглого шлифования 6 и 7, а также экспериментальным стендом, включающим промышленный контроллер модели Simatic S7-200 CPU224HP фирмы Siemens, частотные преобразователи модели VZA21P58AA и VZA20P48AA фирмы Yaskawa, панель оператора модели OP27 фирмы Siemens, энкодер типа E6B2-CWZ6C фирмы Omron

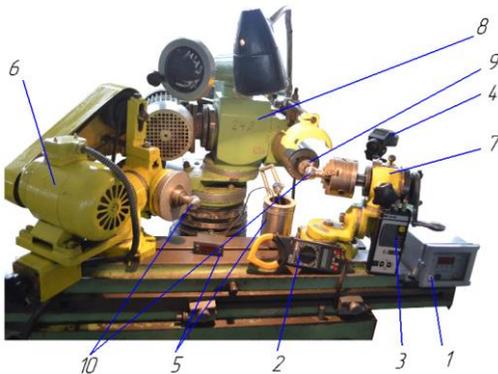


Рисунок 2. – Общий вид экспериментального оборудования, оснастки и приборов

В ходе проведения исследований осуществлена видеозапись изменения фактических частот вращения инструмента 9 и заготовки 10, а также изменения мощности, потребляемой двигателем главного движения. Использовались концевые фрезы 9 со специальной заточкой лезвий диаметрами 25, 30, 35 мм, а также специальные сборные режущие инструменты диаметром 30 мм с количеством лезвий от 3 до 6 из твёрдого сплава

T5K10. Заготовки 10 из стали 40X ГОСТ 4543 обрабатывались без применения смазочно-охлаждающей жидкости. Диапазон режимов обработки выбран на основе расчётных формул (1)–(4) и составляет $n_1 = 3000 \div 12000 \text{ мин}^{-1}$, $n_2 = 2 \div 25 \text{ мин}^{-1}$, $S_n = 0,5 \div 6 \text{ мм/мин}$.

Для тарирования и контроля показаний экспериментального стенда проводилось измерение частот вращения инструмента и заготовки в процессе обработки при помощи тахометра 1 модели ТЭ-02.

Мощность, потребляемая двигателем главного движения, измерялась при помощи соответствующих блоков экспериментального стенда, а также контролировалась путём измерения тока в электрической цепи станка с использованием токоизмерительных клещей 2 модели Mastech M266.

Вибрации в ходе эксперимента измерялись виброметром 3 модели «Октава-101ВМ», измерительная часть которого с помощью винта была прикреплена к корпусу приспособления для наружного круглого шлифования 6.

Температура обрабатываемой сферической поверхности детали контролировалась бесконтактным методом с помощью пирометра 4 модели «Optris LS». Температура стружки измерялась с помощью калориметра 5 оригинальной конструкции с электронным термометром Eliwell ID974, который устанавливался на столе станка. Для сравнения показаний температуры при различных условиях обработки использован коэффициент приведенной интенсивности изменения температуры, который рассчитывается как отношение изменения температуры к единице объёма или площади снимаемого слоя, или длине пути инструмента и единице времени.

Для исследования деформации и стружкообразования применялся весовой метод, метод непосредственного измерения и инструментальный микроскоп модели БМИ-1Ц.

Износ инструмента контролировался методом непосредственного измерения при помощи лупы Бринелля и инструментального микроскопа модели БМИ-1Ц.

Контроль шероховатости обработанной сферической поверхности производился при помощи образцов шероховатости поверхности (сравнения) ОШС-ФТП 0,4-12,5 ГОСТ 9376, на профилографе-профилометре модели «Taylor Hobson precision Form Taly surf 120», а также на атомно-силовом микроскопе модели NT-206 измерялись субмикронеровности и микротвёрдость поверхности.

Точность формы сферической поверхности контролировалась микрометром МК 50-1 ГОСТ 6507.

Для сравнения производилась обработка сфер резцом Pafana SVJCR 2020 на токарном станке модели 16К20Ф3, оснащённом УЧПУ Sinumerik 802D фирмы Siemens, с измерением температуры, параметра Ra шероховатости и размеров диаметра обработанной поверхности сферы.

В ходе измерения фактических частот вращения инструмента и детали установлено, что частота вращения инструмента на рабочем ходу снижается на 3% по сравнению с холостым ходом, а при частоте вращения более 6300 мин^{-1} отмечено снижение частоты вращения на 3% при увеличении диаметра инструмента от 25 до 35 мм. Также отмечено колебание частот вращения инструмента и заготовки на рабочем ходу – снижение на этапе врезания и увеличение на этапе выхаживания в пределах $3\div 7\%$. Эти изменения частот учитывались при проведении экспериментов. Примеры графиков изменения частот вращения инструмента и заготовки представлены на рисунке 3.

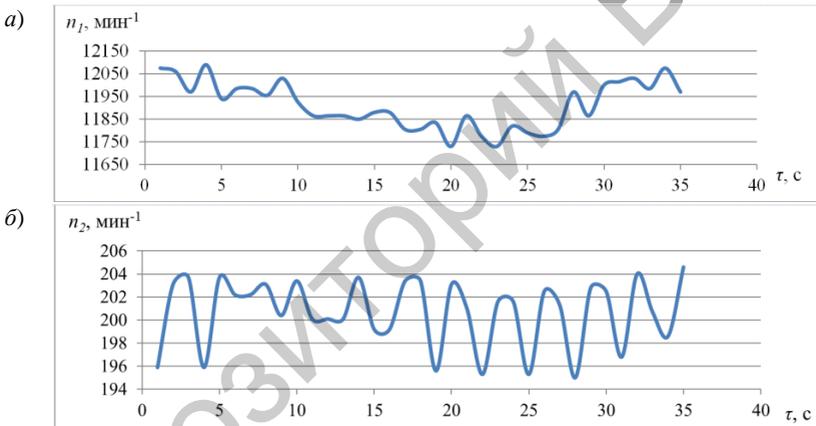


Рисунок 3. – Изменения фактической частоты вращения инструмента (а) и заготовки (б) при скоростной обработке неполной сферической поверхности диаметром 35 мм с $n_1 = 12000 \text{ мин}^{-1}$, $n_2 = 200 \text{ мин}^{-1}$

При исследовании стружкообразования и деформации срезаемого слоя установлено, что в зависимости от частоты вращения инструмента форма стружки изменяется от ленточной при врезании (рисунок 4, а), до мелкодробленой и каплевидной (рисунок 4, б и в) на переходе выхаживания; коэффициент утолщения стружки K_a изменяется в пределах $1,10\div 1,87$, коэффициент уширения $K_b - 1,0\div 1,21$, а относительный сдвиг $\varepsilon - 2,01\div 2,40$. Полученные соотношения параметров K_a , K_b , ε соответствуют общепринятым данным по деформации срезаемого слоя при других видах обработки конструкционных углеродистых сталей в случаях реализации несвободного резания и имеют несколько меньшие значения, что свидетельствует о более благоприятных условиях скоростного резания.

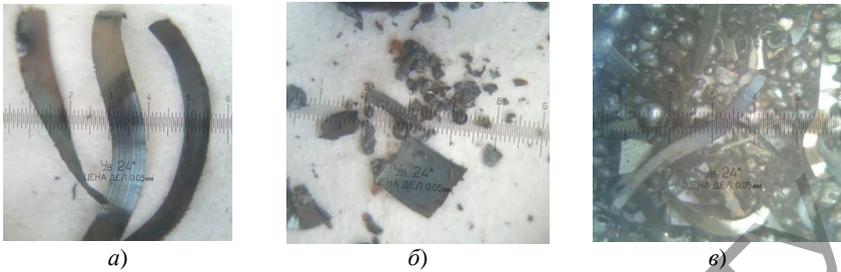


Рисунок 4. – Формы стружки на этапе врезания (а), выхаживания (б), при работе затупленным инструментом с $n_1 = 12000 \text{ мин}^{-1}$ (в)

Измерения мощности станка показали, что при увеличении диаметра инструмента с 25 до 35 мм и частоты вращения с 3150 до 12000 мин^{-1} мощность в процессе обработки возрастает в среднем на $20 \div 40\%$, а по сравнению с холостым ходом станка возрастает на $70 \div 85\%$ при частоте вращения 3383 мин^{-1} и на $45 \div 65\%$ при частоте вращения 12000 мин^{-1} . Это объясняется увеличением силы резания и крутящего момента на лезвии инструмента. Установлено также циклическое изменение мощности и силы резания на этапах врезания и выхаживания инструмента, соответствующее изменению частот вращения на рабочем ходу. На этапе выглаживания мощность резания примерно соответствует мощности холостого хода. С увеличением частоты вращения инструмента до $9000 \text{–} 12000 \text{ мин}^{-1}$ силы резания снижаются и не превышают $25 \div 50 \text{ Н}$, что свидетельствует о преимуществах скоростной обработки с точки зрения нагрузки на шпиндельные узлы станка и приспособления. Примеры графиков изменения мощности привода, потребляемой двигателем главного движения, представлены на рисунке 5.

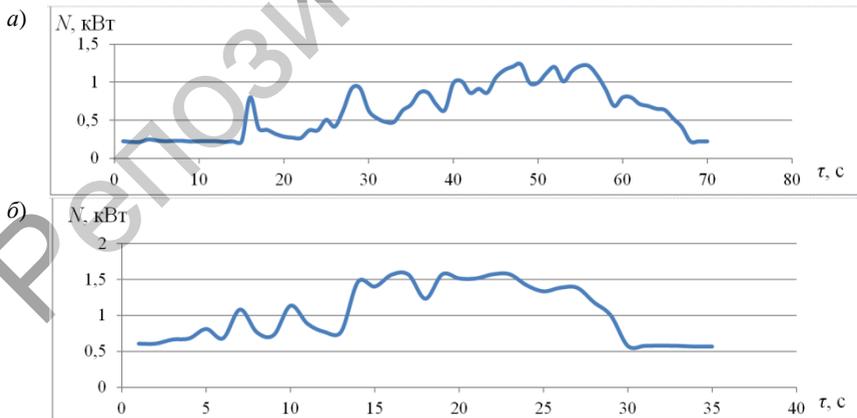


Рисунок 5. – Изменения мощности привода при обработке неполной сферической поверхности детали диаметром 35 мм и частоте вращения $n_2 = 200 \text{ мин}^{-1}$, номинальной частоте вращения инструмента 3150 мин^{-1} (а) и 12000 мин^{-1} (б) во времени

Уменьшение частоты вращения инструмента и соответствующее ей увеличение мощности резания связано с непостоянным значением поперечной подачи на рабочем ходу.

Исследования вибрации показали, что максимальные значения амплитуды колебаний зафиксированы в направлении действия тангенциальной и осевой составляющих силы резания и находятся в пределах 80–120 дБ. С течением времени обработки вибрация возрастает и её изменения соответствуют этапам врезания, выхаживания и выглаживания. С увеличением частоты вращения инструмента до 12000 мин^{-1} эти изменения вибрации уменьшаются. Примеры графиков изменения вибрации в процессе обработки представлены на рисунке 6.

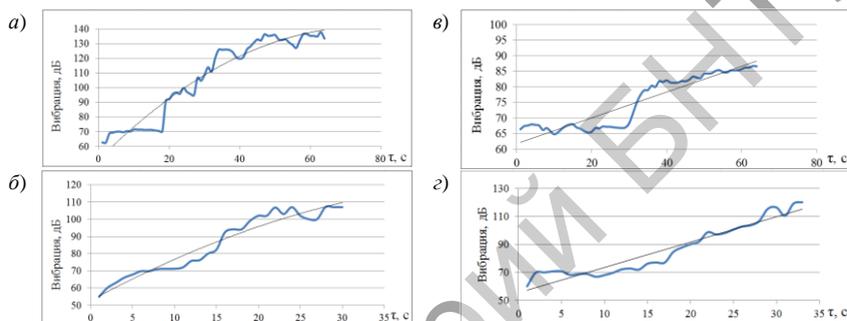
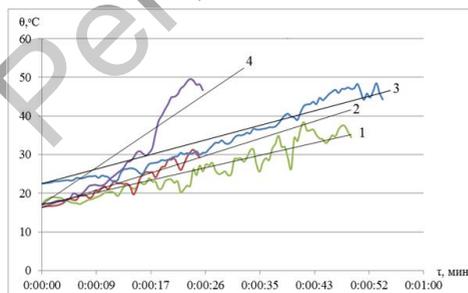


Рисунок 6. – Изменения вибрации при обработке сферической поверхности детали диаметром 35 мм с частотой вращения инструмента $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$ (а), $n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}$ (б), $n_1 = 9000 \text{ мин}^{-1}$ (в), $n_1 = 12000 \text{ мин}^{-1}$ (з) во времени

При определении температуры стружки установлено, что на этапах врезания и выхаживания её значения находятся в пределах $410 \div 460 \text{ }^\circ\text{C}$. При превышении допустимых значений фаски износа лезвий (выше 0,4 мм) и частоте вращения инструмента 12000 мин^{-1} температура стружки резко повышается вплоть до температуры плавления обрабатываемого материала.

Температура детали изменяется от 30 до $120 \text{ }^\circ\text{C}$ в зависимости от частот вращения инструмента и заготовки и их диаметров. Типичные графики изменения температуры детали от времени обработки представлены на рисунке 7.



- 1 – $n_1 = 3150 \text{ мин}^{-1}$ и $S_n = 1,61 \text{ мм/мин}$;
- 2 – $n_1 = 6300 \text{ мин}^{-1}$ и $S_n = 2,25 \text{ мм/мин}$;
- 3 – $n_1 = 9000 \text{ мин}^{-1}$ и $S_n = 0,853 \text{ мм/мин}$;
- 4 – $n_1 = 12000 \text{ мин}^{-1}$ и $S_n = 1,543 \text{ мм/мин}$;

Рисунок 7. – Зависимости изменения температуры поверхности детали диаметром 35 мм от времени обработки с частотой вращения заготовки $n_2 = 200 \text{ мин}^{-1}$

Как видно из графиков, чем больше частота вращения, тем выше значение температуры. Интенсивность накопления теплоты в детали различная и зависит от величины поперечной подачи – глубины резания. Чем больше поперечная подача и меньше время обработки, тем ниже интенсивность накопления теплоты в детали за счёт увеличения теплоотвода в стружку. По мере увеличения фаски износа на задней поверхности лезвия тепловые потоки в инструмент и деталь увеличиваются, о чём свидетельствует рост температуры детали до 120 °С. При этом влияние поперечной подачи (глубины резания или ширины сечения срезаемого слоя) как фактора, улучшающего теплоотвод в стружку, снижается.

Сравнительно невысокие значения температуры нагрева детали (30÷120 °С) свидетельствуют о том, что в поверхностных слоях детали и лезвия инструмента не должно происходить каких-либо существенных структурных и фазовых превращений, что обеспечивает высокое качество обработанной поверхности сферы.

При исследовании изнашивания лезвий инструмента установлено, что для поверхностей лезвия характерно в основном абразивное истирание с образованием фаски износа длиной l_{ϕ} и высотой h_{ϕ} по вспомогательной режущей кромке и прилегающей к ней задней поверхности. Причём форма фаски износа по задней поверхности соответствует радиусу обрабатываемой сферической поверхности.

Результаты обработки данных измеренной величины износа лезвий показали, что допустимые длина и высота фаски износа составляют соответственно $l_{\phi} = 2\div4$ мм и $h_{\phi} = 0,1\div0,4$ мм. При превышении этих значений фаски износа отмечается значительный нагрев обрабатываемой поверхности детали и увеличение её шероховатости в следствии пластического деформирования поверхности.

Изучение процесса изнашивания позволило рекомендовать рациональную форму режущего лезвия инструмента, обеспечивающую минимальные величины износа. Вспомогательная режущая кромка формируется под углом, соответствующим углу установки оси инструмента относительно оси детали, то есть $\eta = 25\div30$ градусов. Криволинейный участок этой режущей кромки от вершины лезвия длиной 2÷4 мм затачивается по радиусу сферы при этом вспомогательный угол в плане рекомендуется в пределах $\varphi_1 = 1\div5$ градусов. При этом главный угол в плане соответствует $\varphi = 67\div74$ градусов и угол при вершине $\varepsilon = 105\div110$ градусов. Такая заточка лезвия или установка сменной режущей пластины обеспечивает минимальные значения шероховатости обработанной поверхности детали и возможность компенсации износа вершины лезвия путём перемещения инструмента или детали вдоль оси вращения инструмента.

Исследование шероховатости сферической поверхности показывает, что комбинированная скоростная лезвийная обработка обеспечивает получение «сетчатого» рельефа и шероховатости поверхности не выше, чем при шлифовании. С увеличением частоты вращения инструмента шероховатость обработанной поверхности снижается с Ra 1,4±0,9 до Ra 1,2±0,4 мкм, причём меньшее значение шероховатости соответствует обработанной поверхности вблизи полюса сферы, что объясняется кинематическими особенностями процесса обработки (рисунок 8).

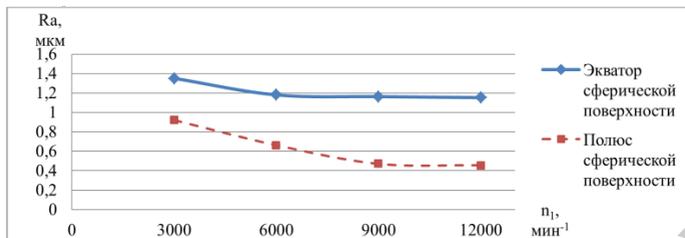


Рисунок 8. – Зависимость шероховатости обработанной сферической поверхности диаметром 35 мм от частоты вращения инструмента

Исследования полученной поверхности сферы на атомно-силовом микроскопе свидетельствуют о формировании субмикронеровностей в пределах $Ra\ 0,021\div0,064$ мкм. Пример топографии поверхности представлен на рисунке 9. Установлено также, что микротвёрдость поверхности после комбинированной скоростной лезвийной обработки составляет $515\div850\ HV_{0,025}$ и превышает в $1,2\div1,5$ раза микротвёрдость необработанной поверхности, причём увеличение частоты вращения инструмента с 3150 до $6300\ \text{мин}^{-1}$ приводит к увеличению микротвёрдости поверхности на $10\div20\%$.

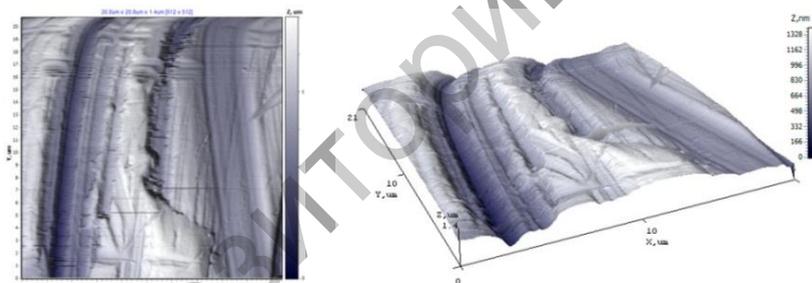


Рисунок 9. – Топография поверхности, полученная на атомно-силовом микроскопе

Анализ результатов измерения диаметров сферы показывает, что отклонения размеров находятся в пределах $0,05$ мм, причём чем больше диаметр сферы и частота вращения заготовки, тем меньше отклонение. Точность обработанной сферической поверхности детали определяется точностью расположения осей вращения детали и инструмента в пределах угловой установки $0,5$ градуса и эксцентриситета не более $0,1$ мм, а также кинематикой резания.

Сравнительные исследования температуры резания и шероховатости поверхности при обработке сферы резцом на токарном станке с ЧПУ показывают, что температура детали возрастает менее интенсивно, чем при комбинированной скоростной обработке и находится в пределах $105\div145\ ^\circ\text{C}$. Значения параметра шероховатости на разных участках сферы различаются и несколько выше ($Ra\ 1,6\div6,3$ мкм), чем при комбинированной скоростной обработке. При этом наблюдается максимальная шероховатость сферической поверхности вблизи оси её вращения за счёт окружной скорости детали, имеющей значения, приближающиеся к нулю. В то же время при

комбинированной скоростной обработке шероховатость поверхности около оси вращения сферы минимальна из-за уменьшения значений окружной скорости детали. Микротвёрдость поверхности после токарной обработки ниже, чем при комбинированной скоростной обработке, и составляет $390\pm 565\text{HV } 0,025$.

В четвертой главе рассмотрена практическая реализация комбинированной скоростной обработки сферических поверхностей деталей.

Разработана технология (ТП № 201603001) и соответствующее оснащение (КД № 201512001) для обработки неполных сферических поверхностей деталей машин. Технологические маршруты изготовления деталей машин с использованием комбинированной скоростной обработкой неполных сферических поверхностей включают следующие основные операции: заготовительную, предварительную обработку, комбинированную скоростную лезвийную обработку неполных сферических поверхностей и контрольную.

Операция комбинированной скоростной лезвийной обработки отличается последовательностью реализации движений резания и съёма припуска в зависимости от формы заготовки, рассчитанным и экспериментально проверенным диапазоном скорости резания, что позволяет заменить операцию шлифования на комбинированную скоростную лезвийную обработку и сократить время обработки.

Разработаны конструкции сборных режущих инструментов с оригинальным резцовым блоком и широким диапазоном регулирования блоков резцовых для установки рациональных значений углов режущих лезвий, их радиального и торцового биений, рекомендованных в главе 3, и обработки поверхностей деталей диаметром $10\text{--}70$ мм. Новизна конструкций подтверждена патентами на изобретения Республики Беларусь. Конструкции некоторых инструментов для обработки сферических поверхностей деталей представлены на рисунке 10 и включают модуль корпусной 3, в который установлены блоки резцовые 1. Закрепление блоков резцовых 1 происходит при помощи зажима 2. Для настройки диаметра режущих инструментов на обработку неполной сферической поверхности используются специальные приспособления на основе стандартного микрометра.

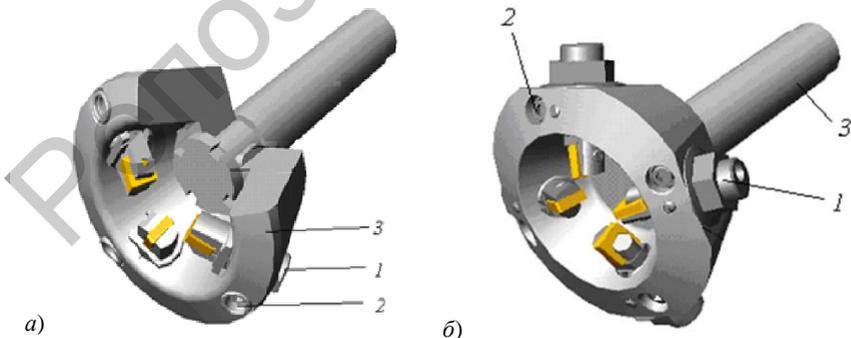


Рисунок 10. – Конструкции сборных режущих инструментов для скоростной обработки сферических поверхностей без регулировки (а) и с микрометрической регулировкой (б) лезвий

Испытания специальных инструментов проводились по методике согласно ГОСТ 23726 «Инструмент металлорежущий. Правила приемки». В качестве режущей части применялись пластины из твердого сплава марки Т5К10 ГОСТ 3882. Форма и размеры пластин соответствовали требованиям ГОСТ 19048. Детали инструмента изготавливались из стали марки 40Х по ГОСТ 4543. Твердость деталей 30...35 HRC.

На модернизированном универсально-заточном станке модели 3М642 с экспериментальным стендом обрабатывались сферические поверхности деталей радиусом 14 мм при следующих режимах резания: глубина резания $t = 1 \div 2$ мм; частота вращения заготовки $n_2 = 20$ мин⁻¹; частота вращения инструмента $n_1 = 3150$ мин⁻¹, что соответствует скорости резания $v = 263,8$ м/мин. Обработано 30 деталей «Палец шаровой» в течение 30 мин.

После испытаний при визуальном осмотре специального сборного режущего инструмента на режущих кромках не отмечено выкрашиваний и сколов, параметр шероховатости Ra обработанной поверхности соответствует требованиям нормативно-технической документации. Для сравнения обработана одна деталь профильным шлифовальным кругом в течение 30 мин, после чего потребовалось провести правку круга. Проведённые испытания модернизированного оборудования и технологической оснастки показали их работоспособность и широкие технологические возможности.

Расчёт производительности и экспериментальная оценка комбинированной скоростной, токарной, фрезерной и шлифовальной обработки сферических поверхностей деталей показали, что комбинированная скоростная обработка лезвийным инструментом позволяет повысить производительность до 30 раз.

С использованием разработанных технологий и оснащения на модернизированном шлифовально-заточном станке изготовлены детали с неполными сферическими поверхностями в количестве около 2 тыс. штук на сумму более 4 000 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Математические модели взаимосвязи окружных скоростей, геометрических параметров и угла установки вращающихся детали и инструмента с параметром Rz шероховатости обрабатываемой сферической поверхности, в результате численной реализации которых определены рациональные для заданных условий значения окружных скоростей детали ($2 \div 25$ м/мин) и инструмента ($200 \div 1400$ м/мин), что позволяет обеспечить управление процессом резания и получение требуемых параметров точности, качества и производительности обработки [2 – 5, 7, 8, 21, 24, 27, 34 – 40, 42].

2. В результате экспериментальных исследований показателей стружкообразования, мощности и силы резания, вибрации с учётом циклических их изменений во времени на переходах врезания, выхаживания и выглаживания поверхностей деталей из углеродистых конструкционных сталей твёрдосплавным лезвийным инструментом от частоты вращения инструмента и заготовки и поперечной подачи установлено, что форма стружки изменяется от ленточной (при частоте вращения инструмента $3150 \div 6000$ мин⁻¹) до мелкодроблёной (при частоте вращения инструмента $9000 \div 12000$ мин⁻¹), степень деформации снижается до значений коэффициента усадки стружки $1,1 \div 1,87$ и относительного сдвига $2,01 \div 2,40$, значение силы резания

не превышает $25\div 50$ Н при частоте вращения инструмента $3150\div 12000$ мин⁻¹ и допустимый уровень вибрации находится в пределах $80\div 90$ дБ. На основании полученных показателей установлен рациональный диапазон частот вращения инструмента $6000\div 9000$ мин⁻¹ и детали $20\div 200$ мин⁻¹, гарантирующие работоспособное состояние технологической оснастки и оборудования [5, 8, 19, 21].

3. Экспериментальные исследования температуры нагрева детали от времени обработки и температуры нагрева стружки от режимов резания, включающие различную интенсивность их изменения, позволили определить пределы изменения температуры детали на переходах врезания и выхаживания ($30\div 120$ °С) и стружки на переходе врезания ($410\div 460$ °С), обеспечивающие получение заданных значений параметров шероховатости поверхности и точности сферы [5, 8, 21, 40].

4. В результате экспериментальных исследований кинетики износа лезвий режущего инструмента, включающих изменение формы и размеров фаски износа от времени обработки и режима резания, установлено, что для обеспечения минимальных значений шероховатости и возможности компенсации износа лезвия путём перемещения инструмента или детали вдоль оси вращения инструмента, форму режущего лезвия инструмента рационально затачивать с криволинейным участком по радиусу обрабатываемой сферы и фаской по задней поверхности высотой $0,1\div 0,4$ мм и длиной $2\div 4$ мм, вспомогательным $1\div 5$ и главным $67\div 74$ градусов углами в плане [5, 8, 40].

5. На основании экспериментальных исследований влияния геометрических параметров установки, соотношения частот вращения инструмента и заготовки и относительной скорости циклического поступательного их перемещения на качество (шероховатость и микротвёрдость) и точность обработки, включающие получение регулярного микрорельефа, установлено, что значения параметра Ra шероховатости поверхности в пределах $0,4\div 1,2$ мкм и отклонения размеров диаметра сферы не более $0,05$ мм достигаются при отклонении положений осей инструмента и заготовки – угловых в пределах $0,5$ градуса и эксцентриситетов не более $0,1$ мм, радиального и торцового биений лезвий не более $0,01$ мм. При этом отмечается повышение микротвёрдости до значений $515\dots 850$ HV $0,025$ [3, 5, 8, 19, 29, 30, 39, 40, 42].

6. В результате сравнительных исследований скоростной обработки вращающимся лезвийным инструментом и токарной обработки на станке с ЧПУ установлено, что скоростная обработка обеспечивает снижение температуры нагрева детали на $20\div 30$ °С и параметра Ra шероховатости поверхности на $0,2\div 0,6$ мкм, а также повышение микротвёрдости поверхности на $200\div 300$ HV $0,025$ и производительности в 2-3 раза. При этом достигнутые значения параметра Ra ($0,4\div 1,2$ мкм) шероховатости поверхности после скоростной лезвийной обработки сопоставимы со шлифованной поверхностью [2, 3, 5, 6, 8, 21, 26 – 28, 30, 39 – 41].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные технология и оснастка могут найти применение в производствах деталей со сферическими поверхностями диаметром $10\div 70$ мм на модернизированных универсальных шлифовально-заточных, фрезерных и других станках, а также на специальных круглошлифовальных или токарных станках, имеющих два привода с частотами вращения инструмента $3000\text{--}20000$ мин⁻¹ и заготовки $20\text{--}200$ мин⁻¹ [1, 5, 6, 8–18, 20, 22, 23, 25–34, 42–45].

Технологии, цельные, составные и сборные режущие инструменты использовались в производстве РИУП «Научно-технологический парк Полоцкого государственного университета» при изготовлении деталей «Седло» и «Клапан» для запорной газовой аппаратуры, пальца шаровой опоры автомобиля, шаровой детали рукоятки в газогенераторных котлах. Выполнены работы объёмом около 2 тыс. штук на сумму более 4 000 руб. Комбинированная скоростная обработка неполных сферических поверхностей внедрена в производство ООО «Гидропресс» при изготовлении деталей гидравлической аппаратуры.

Разработанные по результатам исследований рекомендации приняты при проектировании и изготовлении специальных станков на Витебских заводах ОАО «Вистан» и ОАО «Визас», Оршанском заводе ОАО «Станкозавод «Красный борец», а также при проектировании и изготовлении режущих инструментов на ОАО «Оршанский инструментальный завод».

Результаты исследований внедрены в учебный процесс Полоцкого государственного университета.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Анализ способов обработки сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – № 12. – С. 42–45.
2. Хмельницкий, Р.С. Исследование процесса обработки сферических поверхностей деталей способом охватывающего фрезерования / Р.С. Хмельницкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2007. – № 8. – С. 53–58.
3. Моделирование влияния шероховатости сферической поверхности детали на выбор скорости подачи вращающегося режущего инструмента / Н.Н. Попок, И.П. Кунцевич, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2016. – № 3. – С. 28–38.
4. Взаимосвязь скоростей вращения инструмента и заготовки при механической обработке сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, И.П. Кунцевич, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2016. – № 11. – С. 12–18.
5. Комплексные исследования физических и технологических характеристик процесса обработки сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь // Вестн. Белорусско-Российского ун-та. – 2017. – № 2(55). – С. 87–97.
6. Попок, Н.Н. Особенности обработки сферических и конических поверхностей деталей на токарных станках с ЧПУ / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2017. – № 1(32). – С. 109–121.
7. Изменение передних и задних углов лезвия фрезы при обработке сферических поверхностей детали / Н.Н. Попок, И.П. Кунцевич, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь // Вестн. Баранов. гос. ун-та. Серия «Технические науки». – 2017. – № 5. – С. 71–77.
8. Кинематическое и технологическое обеспечение формирования регулярного микрорельефа сферических поверхностей деталей комбинированной обработкой резанием / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь, В.А. Кукареко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2017. – № 11. – С. 16–25.

Статьи в сборниках научных трудов и материалах конференций

9. Попок, А.Н. Анализ и разработка модульных инструментальных систем / А.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Вып. 7. Промышленность. – Новополоцк : ПГУ, 2004. – С. 64–66.

10. Хмельницкий, Р.С. Анализ конструкций блочно-модульных режущих инструментов / Р.С. Хмельницкий // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Вып. 11. Промышленность. – Новополоцк : ПГУ, 2005. – С. 10–14.

11. Модульное проектирование режущих инструментов / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, А.В. Сидикевич, Р.С. Хмельницкий // Республиканский межведомственный сборник научных трудов «Машиностроение», 2005. – Вып. 21, Т.1. – С. 125–130.

12. Анализ точностных параметров блочно-модульных фрез / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, А.В. Сидикевич, Р.С. Хмельницкий // Республиканский межведомственный сборник научных трудов «Машиностроение», 2007. – Вып. 22. – С. 89–93.

13. Хмельницкий, Р.С. Анализ применения модульного принципа в конструкции режущего инструмента / Р.С. Хмельницкий, Д.В. Пяткин // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Вып. 23. Промышленность. – Новополоцк : ПГУ, 2007. – С. 27–29.

14. Хмельницкий, Р.С. Применение систем автоматизированного проектирования и изготовления режущих инструментов / Р.С. Хмельницкий, Д.В. Пяткин, М.В. Черневич // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Вып. 23. Промышленность. – Новополоцк : ПГУ, 2007. – С. 141–144.

15. Хмельницкий, Р.С. Блочно-модульные режущие инструменты / Р.С. Хмельницкий, Н.Н. Попок // Сборник научных работ студентов высших учебных заведений Республики Беларусь «НИРС 2006». – Минск : БГУ, 2007. – С. 129–133.

16. Хмельницкий, Р.С. Способы механической обработки наружной поверхности сферы / Р.С. Хмельницкий, Г.И. Гвоздь, В.В. Спектор // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Вып. 31. Промышленность. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – С. 134–137.

17. Попок, Н.Н. Способы обработки сферических поверхностей деталей и технологическое оснащение для их реализации / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, Г.И. Гвоздь // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. : в 3-х т. Т. II / под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк : ПГУ, 2009. – С. 315–319.

18. Блочно-модульный режущий инструмент для высокоскоростной обработки / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, А.В. Сидикевич, Р.С. Хмельницкий // Машиностроение-2010: технологии-оборудование-инструмент-качество : Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–8 апреля 2010 г. : материалы / редкол.: А.Ф. Ильющенко (отв. ред.) [и др.]. – Минск : ПЧУП «Бизнесофсет», 2010. – С. 34–36.

19. Хмельницкий, Р.С. Параметры срезаемого слоя, деформация и шероховатость при обработке сферических поверхностей / Р.С. Хмельницкий, Г.И. Гвоздь, А.В. Цубанов // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Вып. 45. Промышленность. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – С. 91–99.

20. The theoretikalfundamentajs of high-speed milling / A. Kudelko, R. Khmialnitski // Junior researchers' conference : materials of junior researchers' conference, Polotsk State University, Novopolotsk, April 28–29, 2010 : in 2 p. / PSU. – Issue 2. Part 2 : Technology. – P. 88–91.

21. Попок, Н.Н., Высокоскоростная обработка сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий // Инновационные технологии в машиностроении : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ, Новополоцк, 19–20 октября 2011 г. / Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелег. – Новополоцк, 2011. – С. 87–89.

22. Хмельницкий, Р.С. Анализ конструкций технологического оснащения для точения выпуклых сферических поверхностей на универсальных токарных станках / Р.С. Хмельницкий, А.С. Максимчук // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Вып. 68. Промышленность. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – С. 89–91.

23. Хмельницкий, Р.С. Анализ конструкций технологического оснащения для точения вогнутых сферических поверхностей на универсальных токарных станках / Р.С. Хмельницкий, А.С. Максимчук // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – Вып. 68. Промышленность. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – С. 92–94.

24. Попок, Н.Н. Анализ особенностей кинематики и геометрии процесса высокоскоростного резания / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, М.В. Черневич // «Технология-оборудование-инструмент-качество» : тез. докл. Междунауч.-техн. конф. Минск, 9–10 апреля 2014 г. / редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2014. – С. 93–95.

25. Попок, Н.Н. Выбор способов обработки поверхностей деталей на станках с ЧПУ / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 4–5 февраля 2015 г. ; редкол.: Ф.И. Пантелеенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2015. – С. 116–117.

26. Хмельницкий, Р.С. Анализ производительности обработки поверхностей детали «Палец шаровой» инструментами зарубежных фирм / Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Вып. 10 (80). Промышленность. Машиностроение. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – С. 132–135.

27. Kuznechyk, M. High-speed milling of spheres / M. Kuznechyk, R. Khmialnitski // European and national dimension in research: material of VIII junior researchers' conference, Novopolotsk, April 27–28, 2016 : in 3 p. / Polotsk State University; publishing board: D. Lazouski (chairperson) [et al.]. –Novopolotsk, 2016. – Issue 3. part 3: Technology. – P. 139–142.

28. Хмельницкий, Р.С. Исследование шероховатости сферической поверхности детали при обработке на токарных станках с ЧПУ / Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Вып. 15 (85). Промышленность. Машиностроение. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – С. 162–165.

29. Хмельницкий, Р.С. Исследование точности фрезерования и точения сферических поверхностей деталей / Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Вып. 15 (85). Промышленность. Машиностроение. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – С. 165–168.

30. Попок, Н.Н. Исследование шероховатости и точности сферических поверхностей деталей обработанных фрезерованием / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов. // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы

Международ. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апреля 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки РФ, Белорусско-Российский ун-т ; редкол. : И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорусско-Российский ун-т, 2017. – С.41–42.

31. Kuznechyk, M. Analysis of methods of receiving spherical surfaces of details / M. Kuznechyk, V. Anisimov, R. Khmialnitski. // Electronic collected materials of IX Junior Researchers' Conference «European and national dimension in research / Technology», Novopolotsk, April 26–27, 2017 / Polotsk State University; ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2017. – 1 CD-ROM. – P. 180–184.

Тезисы докладов

32. Попок, Н.Н. Высокоскоростная обработка сферических поверхностей / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апреля 2006 г. : в 3 ч. / Белорусско-Российский ун-т ; редкол.: И.С. Созонов [и др.]. – Могилев, 2006. – Часть 1. – С. 93.

33. Основы САПР блочно-модульных режущих инструментов / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич, А.В. Цубанов // Автоматизация технологических процессов : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 марта 2011 г. ; редкол.: Г.Н. Здор (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2011. – С. 29–30.

34. Попок, Н.Н. Режимы резания при высокоскоростном охватывающем фрезеровании сферических поверхностей / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, А.В. Цубанов // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 апреля 2013 г. ; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 80–82.

35. Попок, Н.Н. Анализ геометрии и кинематики процесса обработки режущим инструментом сферической поверхности детали / Н.Н. Попок, И.П. Кунцевич, Р.С. Хмельницкий // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 8–9 апреля 2015 г. ; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 142–144.

36. Попок, Н.Н. Математическая модель кинематики процесса механической обработки сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, И.П. Кунцевич, Р.С. Хмельницкий // Материалы 13-й Международ. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике» (68-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. – Минск : БНТУ, 2015. – Т. 3. – С. 392.

37. Попок, Н.Н. Расчёт изменения геометрических параметров инструментов в процессе механической обработки сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, И.П. Кунцевич, Р.С. Хмельницкий // Материалы 13-й Международ. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике» (68-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. – Минск : БНТУ, 2015. – Т. 3. – С. 393.

38. Выбор подачи при обработке вращающимся режущим инструментом сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, И.П. Кунцевич, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. / редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2016. – С. 126–128.

39. Проектирование технологии обработки сферических поверхностей деталей на токарных станках с ЧПУ и универсальных станках / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, Г.И. Гвоздь // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому), Гомель, 20–21 октября 2016 г. ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. С.И. Тимошина. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. – С. 35–36.

40. Попок, Н.Н. Технологическое обеспечение скоростного фрезерования сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 5 апреля 2017 г. / В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 179–181.

41. Интенсивность тепловыделения при обработке конических и сферических поверхностей деталей на токарных станках с ЧПУ / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов, А.В. Сидикевич // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 5 апреля 2017 г. / В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 181–183.

42. Влияние круговой подачи на шероховатость сферической поверхности детали / Н.Н. Попок, И.П. Кунцевич, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике» (70-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 3. – С. 445.

Патенты Республики Беларусь

43. Многолезвийный блочно-модульный режущий инструмент : полез. модель ВУ3127 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич, И.Я. Сопиков. – Опубл. 30.10.2006.

44. Способ установки сменной режущей пластины в режущем инструменте : пат. ВУ 19260 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич, И.Я. Сопиков. – Опубл. 30.08.2012.

45. Режущий инструмент со сменной режущей пластиной : пат. ВУ 19226 / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий, А.В. Сидикевич, И.Я. Сопиков. – Опубл. 30.08.2012.

РЭЗІЮМЭ

Хмяльніцкі Руслан Сяргеевіч

**Тэхналогія хуткаснай апрацоўкі няпоўных сферычных паверхняў
дэталей машын вярчальным лязовым інструментам**

Ключавыя словы: няпоўная сферычная паверхня, тэхналогія, хуткасная апрацоўка рэзаннем, вярчальны рэзальны інструмент, мадэрнізаваны металарэзы станок.

Мэта працы: распрацаваць тэхналогію хуткаснага рэзання няпоўных сферычных паверхняў дэталей машын вярчальным лязовым інструментам, якая забяспечвае павышэнне прадукцыйнасці і якасці апрацоўкі.

Метады даследаванняў і выкарыстаная апаратура: аналітычны і эксперыментальны, вымярэнне частаты кручэння (тахометр ТЭ-02), сілы току ў электрычным ланцугу станка (токавымяральныя абцугі Mastech M266), магутнасці станка (кантролер фірмы «Siemens»), тэмпературы (пірометр Optis LS, каларыметр з электронным тэрмометрам Eliwell ID974), шурпатасці (прафілограф-прафілометр мадэлі «Taylor Hobson precision Form Talysurf 120»), вібрацыі (віброметр Актава-101ВМ), геаметрыі і зносу рэзальных лёзаў (інструментальны мікраскоп БМИ-1Ц).

Атрыманая вынікі і іх навізна: матэматычныя залежнасці, якія злучаюць акруговыя хуткасці рэжучага інструмента і загатоўкі з геаметрычнымі параметрамі ўзаемнага размяшчэння восяў кручэння, апрацаванай паверхні дэталі, рэзальных лёзаў, якія дазваляюць разлічыць рацыянальны значэнні хуткасцей для забеспячэння патрэбных велічынь шурпатасці і адхіленняў паверхні дэталі.

Эксперыментальныя залежнасці фізічных і тэхналагічных характарыстык хуткаснага рэзання ад рэжымаў і часу апрацоўкі, якія адрозніваюцца ўстаноўленым памяншэннем дэфармацыі зразасмага слою ў 1,5–2 разы, змяненнем сілы рэзання ў межах 25–50 Н, тэмпературы нагрэву дэталі 30÷120 °С пры дапушчальных значэннях вібрацыі 80÷90 дБ, што забяспечвае зніжэнне шурпатасці да Ra 0,4÷1,2 мкм і павелічэнне мікрашурпатасці да 515÷850 HV 0,025 апрацаванай паверхні, а таксама павышэнне прадукцыйнасці апрацоўкі ў 2–3 разы ў параўнанні з тачэннем.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: распрацаваны тэхналогія і тэхналагічнае абсталяванне, праведзена мадэрнізацыя ўніверсальнага станка для хуткаснай лязовай апрацоўкі сферычных паверхняў дэталей машын, устаноўлены рацыянальныя рэжымы апрацоўкі цвёрдасплаўным інструментам вугляродзістых канструкцыйных сталей (акруговыя хуткасці інструмента 400÷600 м/мін і загатоўкі 2÷25 м/мін, папярочная падача 0,5÷6 мм/мін). З выкарыстаннем распрацаваных тэхналогій выраблена каля 2000 розных дэталей са сферычнымі паверхнямі на суму больш за 4000 руб.

Галіна выкарыстання: машынабудаванне, механічная апрацоўка сферычных паверхняў дэталей дыяметрам 10÷70 мм.

РЕЗЮМЕ

Хмельницкий Руслан Сергеевич

Технология скоростной обработки неполных сферических поверхностей деталей машин вращающимся лезвийным инструментом

Ключевые слова: неполная сферическая поверхность, технология, скоростная обработка резанием, вращающийся режущий инструмент, модернизированный металлорежущий станок.

Цель работы: разработать технологию скоростной обработки неполных сферических поверхностей деталей машин вращающимся лезвийным инструментом, обеспечивающей повышение производительности и качества обработки.

Методы исследований и использованная аппаратура: аналитический и экспериментальный, измерение частоты вращения (тахометр ТЭ-02), силы тока в электрической цепи станка (токоизмерительные клещи Mastech M266), мощности станка (контроллер фирмы «Siemens»), температуры (пирометр Optris LS, калориметр с электронным термометром Eliwell ID974), шероховатости (профилограф-профилометр модели «Taylor Hobson precision Form Talysurf 120»), вибрации (виброметр Октава-101ВМ), геометрии и износа режущих лезвий (инструментальный микроскоп БМИ-1Ц).

Полученные результаты и их новизна: математические зависимости, связывающие окружные скорости режущего инструмента и заготовки с геометрическими параметрами взаимного расположения осей вращения, обрабатываемой поверхности детали, режущих лезвий, которые позволяют рассчитать рациональные значения скоростей для обеспечения требуемых величин шероховатости и отклонений поверхности детали.

Экспериментальные зависимости физических и технологических характеристик скоростного резания от режимов и времени обработки, отличающиеся установленным уменьшением деформации срезаемого слоя в 1,5-2 раза, изменением силы резания в пределах 25-50 Н, температуры нагрева детали 30±120 °С при допустимых значениях вибрации 80±90 дБ, что обеспечивает снижение шероховатости до Ra 0,4±1,2 мкм и увеличение микротвёрдости до 515±850 HV 0,025 обработанной поверхности, а также повышение производительности обработки в 2-3 раза по сравнению с течением.

Рекомендации по использованию: разработаны технология и технологическое оснащение, проведена модернизация универсального станка для скоростной лезвийной обработки сферических поверхностей деталей машин, установлены рациональные режимы обработки твердосплавным инструментом углеродистых конструкционных сталей (окружные скорости инструмента 400±600 м/мин и заготовки 2±25 м/мин, поперечная подача 0,5±6 мм/мин). С использованием разработанных технологий изготовлено порядка 2000 различных деталей со сферическими поверхностями на сумму более 4000 руб.

Область применения: машиностроение, механическая обработка сферических поверхностей деталей диаметром 10±70 мм.

SUMMARY

Khmielnitski Ruslan

Rapid machining technology of partial spherical surfaces of machine details by rotary wedge tool

Keywords: partial spherical surface, technology, rapid cutting, rotary cutter tool, improved cutting machine.

Purpose of research work: to develop a rapid processing technology of partial spherical surfaces of machine parts with a rotating wedge tool, which can provide an increased productivity and processing quality.

Methods of research: analytical and experimental, rotation rate measurements (tachometer TE-02), force of current in an electrical circuit of the machine (Mastech M266 Clamp Meter), machine power (controller designed by firm Siemens), temperature (Pyrometer Optris LS, calorimeter with digital thermometer Eliwell ID974), roughness (profilograph-profilometer Taylor Hobson precision Form Talysurf 120), vibration (vibrometer Oktave-101VM), geometry and wear of cutting edges (instrumental microscope BMI-1C).

The results and their novelty: the mathematical relationships between the rotary speed of the cutter tool and the preform with geometrical parameters of mutual position of axes of rotation, the machined surface of the detail, the cutting edges have been obtained and can be considered in calculating the rational values of speed providing the required surface roughness and deviation of the detail.

The experimental dependencies of the physical and technological characteristics of rapid cutting on machining regimes and time were obtained that characterized by a decrease in the deformation of a cutting layer by a factor of 1,5-2 times; changes in cutting force within 25-50 N, heating temperature of the detail of 30÷120 °C at acceptable vibration values of 80 ÷ 90 dB lead to a decrease in the surface roughness up to Ra 0,4÷1,2 µm and an increase in microhardness up to 515÷850 HV 0,025. The increase in machining productivity was of the order of 2-3 times compared to turning.

Recommendations for application: technology and equipment are developed, the modernization of the universal machine for rapid blade machining of spherical surfaces of machine details was carried out. The rational regimes of machining with carbide tool for carbon structural steels have been determined (velocity tool – 400 ÷ 600 m/min and velocity workpiece 2÷25 m/min, cross feed 0,5 ÷6 mm/min). The use of technology provides manufacturing of around 2.000 different details with spherical surfaces to the amount of more than 4000 rubles.

Fields of Application: mechanical engineering, machining of spherical surfaces of details with a diameter of 10÷70 mm.