

УДК 621.91.01/02

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ  
НЕПОЛНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК;  
Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ; В.С. АНИСИМОВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлен технологический маршрут получения неполных сферических поверхностей деталей машин с использованием различных способов комбинированной скоростной лезвийной обработки. Описаны конструкции специальных многолезвийных режущих инструментов и вариант модернизации универсально-заточного станка для реализации комбинированной скоростной обработки. Приведен алгоритм назначения режимов резания для обработки неполных сферических поверхностей с обеспечением параметра  $Ra$  шероховатости поверхности в пределах  $0,4...1,2$  мкм и отклонением геометрической формы не более  $0,05$  мм.*

**Ключевые слова:** *неполная сферическая поверхность, технология, скоростная обработка резанием, многолезвийный режущий инструмент, модернизация оборудования, точность, шероховатость.*

**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 [1]. Эти детали отличаются габаритами, предъявляемыми к ним требованиями по точности, качеству и надежности. Для их изготовления используются различные методы обработки: литья, давления, порошковой металлургии, резания. С целью повышения качества и точности получения сферических поверхностей чаще всего применяется резание, включающее как лезвийную, так и абразивную обработку [2].

Как известно, абразивная обработка имеет низкую производительность, сопровождается прижогами, шаржированием абразивными зёрнами и насыщением химическими веществами обработанной поверхности детали. Вследствие этого в настоящее время зарубежные и отечественные производители стремятся исключить абразивную обработку из технологических процессов получения деталей и заменить её высокоскоростной лезвийной обработкой [3]. Высокоскоростная обработка (ВСО) осуществляется при частотах вращения порядка  $10\ 000...40\ 000$  мин<sup>-1</sup>, что соответствует скорости резания более 200 м/мин и обеспечивает снижение сил и температуры за счёт создания благоприятных условий для деформационных процессов и отвода теплоты преимущественно в стружку. В свою очередь, это позволяет сократить основное машинное время, повысить производительность резания и расширить возможности чистовой обработки лезвийным инструментом до качества абразивной обработки. Однако ВСО требует применения дорогостоящих приводов и шпинделей станков, специальных инструментальных материалов и покрытий, не позволяет использовать режущие инструменты большого диаметра (как правило, используют фрезы диаметром не более 20 мм) 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<sup>-1</sup> и более, для скоростной обработки лезвийными режущими инструментами, в частности вращающимися, оснащенными стандартными режущими пластинами. Применительно к получению неполных (ограниченных с одной или двух сторон) наружных и внутренних сферических поверхностей деталей может быть реализована комбинированная лезвийная обработка на основе вращений инструмента и детали и циклического поступательного их перемещения [4].

**Основная часть.** Технологические маршруты изготовления деталей машин с использованием комбинированной скоростной лезвийной обработки неполных сферических поверхностей включают следующие основные операции: заготовительную, предварительную обработку, комбинированную скоростную лезвийную обработку неполных сферических поверхностей и контрольную.

Исходя из материала, конфигурации и количества изготавливаемых деталей с неполными сферическими поверхностями выбирается один из методов получения заготовки – литьём, штамповкой, холодной высадкой, прокаткой, порошковой металлургией.

Обработку неполных сферических поверхностей деталей целесообразно производить после обработки всех других поверхностей детали. В зависимости от конструкции детали для обработки этих поверхностей, могут применяться токарные, фрезерные, сверлильные, шлифовальные и другие необходимые станки. Полученные в результате предварительной обработки поверхности используются в качестве базовых для последующей операции комбинированной скоростной лезвийной обработки. Кроме того,

на операциях предварительной обработки производится черновая обработка участка со сферической поверхностью, заключающаяся либо в образовании сферической поверхности с припуском под окончательную комбинированную скоростную обработку, либо в образовании цилиндрической поверхности со снятыми фасками. При необходимости термической обработки детали сферическая поверхность предварительно обрабатывается с припуском под окончательную обработку.

Подбор оборудования и технологического оснащения для комбинированной скоростной обработки производится исходя из обеспечения точной установки осей вращения заготовки и инструмента под углом  $\eta$ , значение которого зависит от формы неполной сферической поверхности и рассчитывается по формуле:

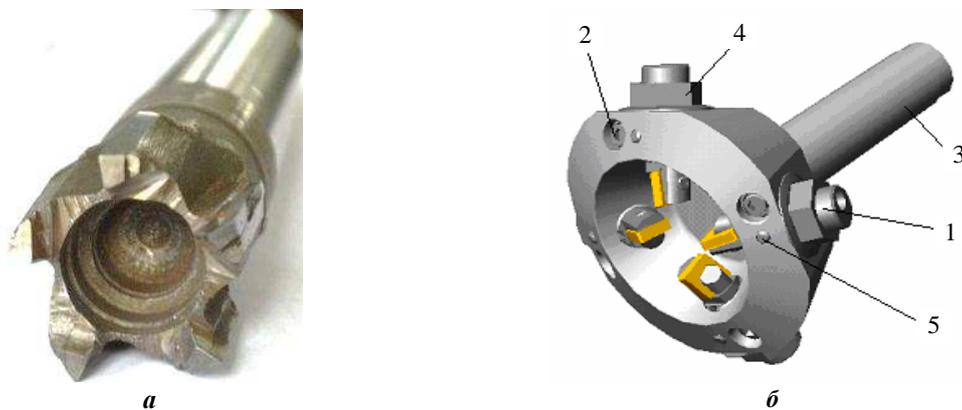
$$\eta = \arccos \left( \sqrt{\frac{H}{D_{сф}}} \right), \quad (1)$$

где  $H$  – высота сферической поверхности, мм;  $D_{сф}$  – диаметр сферической поверхности детали, мм.

Для обработки сферических поверхностей  $D_{сф}$  режущие лезвия инструмента настраиваются на размер

$$D = \sqrt{D_{сф} H}. \quad (2)$$

Для комбинированной скоростной обработки неполных сферических поверхностей используется многолезвийный режущий инструмент. Напайной режущий инструмент (рисунок 1, а) обладают низкой универсальностью, так как не имеют возможности перенастройки на диаметр обрабатываемой сферической поверхности. Но в условиях единичного производства при обработке сферических поверхностей малого диаметра (до 35 мм) его можно изготовить из концевой фрезы с напайными пластинами. Сборный режущий инструмент (рисунок 1, б) обладает большей универсальностью, так как имеет возможность перенастройки лезвий на размер  $D$ . Для этого в конструкции режущего инструмента предусмотрено применение оригинальных резовых блоков 1, которые устанавливаются в корпус 3, и при помощи лимб-гайки 4 могут обеспечить точную и быструю перенастройку лезвий на размер  $D$  без снятия инструмента со станка. С целью предотвращения поворота блока резового 1 вокруг оси при настройке на размер предусмотрен штифт резьбовой 5. Закрепление блоков резовых 1 происходит при помощи зажима 2.



**Рисунок 1. – Конструкция напайного (а) и сборного (б) режущего инструмента для комбинированной скоростной обработки сферических поверхностей**

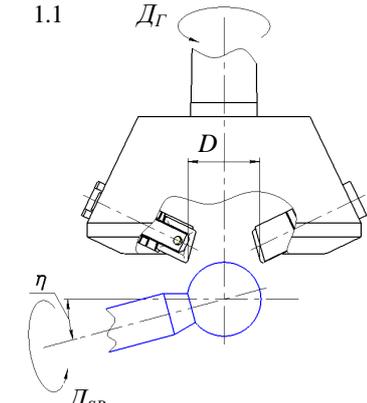
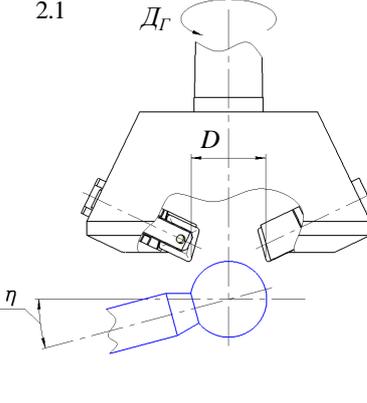
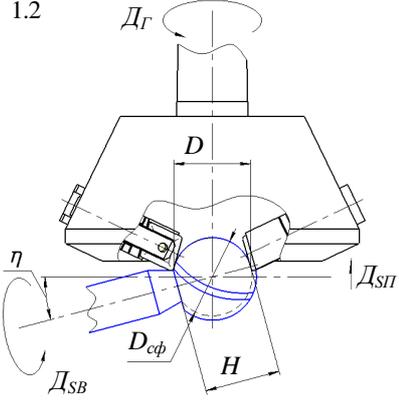
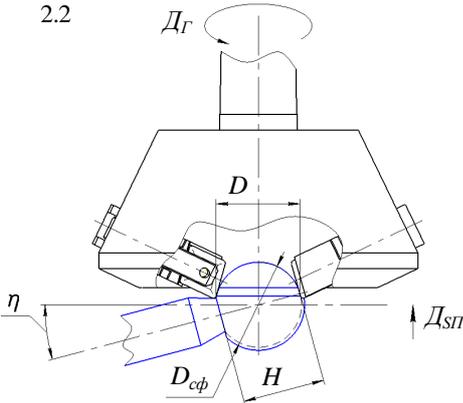
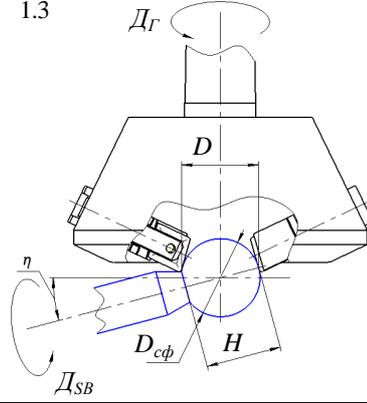
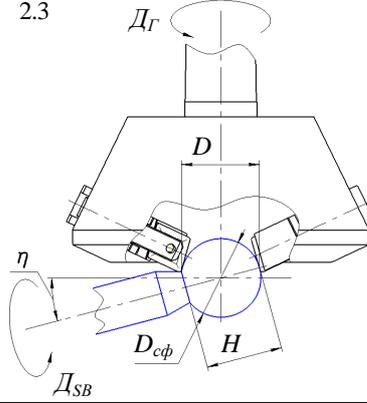
В качестве базового оборудования могут быть использованы заточные, шлифовальные фрезерные и токарные станки, соответствующим образом модернизированные. Например, предлагается использовать универсально-заточной станок 1 модели 3М642 с приспособлением для наружного круглого шлифования 2 модели 3Е642Е.П17 (рисунок 2). Модернизация предлагаемого оборудования заключается в оснащении специальным стендом, который оснащен частотными преобразователями 4, позволяющими увеличить частоту вращения шпинделя станка до  $12\,000\text{ мин}^{-1}$ , а также бесступенчато регулировать частоту вращения шпинделя станка и приспособления.

Комбинированная скоростная лезвийная обработка неполных сферических поверхностей деталей может осуществляться двумя способами, отличающимися последовательностью реализацией движений резания, приведёнными в таблице 1.

По *первому способу* первоначально инструменту и заготовке сообщаются вращательные движения вокруг своих осей  $D_I$  и  $D_{SB}$  соответственно (таблица 1, п. 1.1). Затем в зависимости от применяемого оборудования и технологического оснащения инструменту или заготовке сообщается поступательное дви-

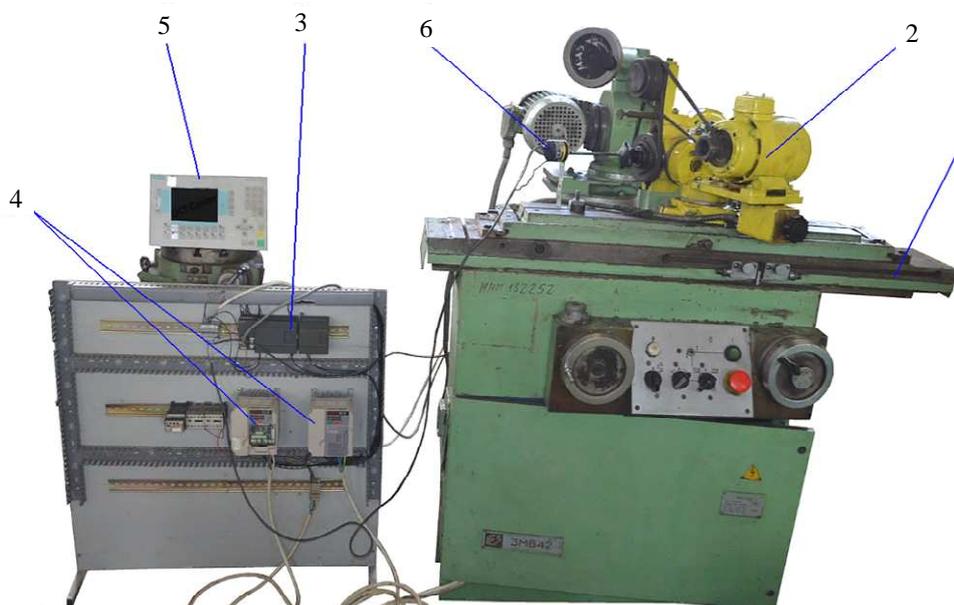
жение подачи  $D_{СП}$  (таблица 1, п. 1.2). В результате обеспечивается равномерное снятие припуска со всей сферической поверхности заготовки. При выходе вершин лезвий инструмента на ось сферической поверхности, в результате которого обеспечивается окончательный размер  $D_{сф}$ , поступательное движение подачи  $D_{СП}$  отключается, и начинается процесс выглаживания сферической поверхности за счёт вращения инструмента  $D_{Г}$  и заготовки  $D_{SB}$  (таблица 1, п. 1.3). Данный способ обработки применяется при необходимости снятия больших значений величины припуска.

Таблица 1. – Способы реализации комбинированной скоростной лезвийной обработки в технологическом маршруте

Первый способ	Второй способ
<p>1.1 <math>D_{Г}</math></p> 	<p>2.1 <math>D_{Г}</math></p> 
<p>1.2 <math>D_{Г}</math></p> 	<p>2.2 <math>D_{Г}</math></p> 
<p>1.3 <math>D_{Г}</math></p> 	<p>2.3 <math>D_{Г}</math></p> 

*Второй способ* применяется при окончательной обработке с небольшими значениями припуска и заключается во врезании на окончательный размер сферической поверхности при отсутствии вращательного движения заготовки. То есть вначале инструменту сообщают вращательное главное движение  $D_{Г}$  (таблица 1, п. 2.1). Далее при помощи поступательного движения подачи  $D_{СП}$  осуществляется врезание инструмента на размер сферической поверхности  $D_{сф}$  в невращающуюся заготовку (таблица 1, п. 2.2). После

чего поступательное движение подачи  $D_{СП}$  отключается, а заготовке сообщается вращательное движение подачи  $D_{SB}$  вокруг собственной оси, в результате которого осуществляется распространение процесса резания с образованием сферической поверхности на детали – процесс выглаживания (таблица 1, п. 2.3).



1 – станок модели 3М642; 2 – приспособление для наружного круглого шлифования 3Е642Е.П17; 3 – промышленный контроллер; 4 – частотные преобразователи; 5 – операторская панель; 6 – энкодер

Рисунок 2. – Модернизированный универсально-заточной станок модели 3М642

Назначение режимов резания для скоростной комбинированной обработки неполной сферической поверхности проводится в следующей последовательности [5]:

1) назначается скорость главного движения резания (окружная скорость инструмента)  $v_1$  исходя из рекомендаций справочников или каталогов инструментальных фирм в зависимости от обрабатываемого и выбранного инструментального материала;

2) рассчитывается подача на оборот инструмента по формуле:

$$S_o = \sqrt{\frac{-1 + \sqrt{1 + 64r^2 a^2}}{2a^2}}, \quad (3)$$

в которой

$$a = \frac{2r + R_{сф}}{2 \cdot R_{сф} \cdot Rz} = \frac{4r + D_{сф}}{2D_{сф} \cdot Rz},$$

где  $R_{сф}$  ( $D_{сф}$ ) – радиус (диаметр) сферической поверхности детали, мм;  $r$  – радиус закругления вершины лезвия, мм;  $Rz$  – шероховатость сферической поверхности, мм;

3) рассчитывается частота вращения инструмента

$$n_1 = \frac{1000 \cdot v_1}{\pi \cdot \sqrt{D_{сф}} H}; \quad (4)$$

4) рассчитывается частота вращения заготовки

$$n_2 = \frac{n_1 S_o}{\pi D_{сф}}; \quad (4)$$

5) назначается исходя из полученных результатов исследований [6] поперечная подача в диапазоне 0,5...6 мм/мин.

Для проверки качества и точности обработки неполной сферической поверхности детали первоначально производится визуальный осмотр, в ходе которого контролируется наличие «сетчатого» рельефа на поверхности. Отсутствие «сетчатого» рельефа свидетельствует об отклонении точности формы и по-

вышенной шероховатости поверхности. Определение параметра шероховатости на экваторе сферической поверхности производится путём сравнения с образцами шероховатости поверхности, полученными торцовым фрезерованием, или измеряется при помощи специальных измерительных средств, таких, например, как профилограф-профилометр модели «Taylor Hobson precision Form Taly surf 120».

Результаты измерения шероховатости сферической поверхности диаметром 35 мм после комбинированной скоростной лезвийной обработки с частотой вращения инструмента от 3150 до 12000 мин<sup>-1</sup> показали, что параметры Ra шероховатости на полюсе и экваторе сферической поверхности получаются разными (рисунок 3).

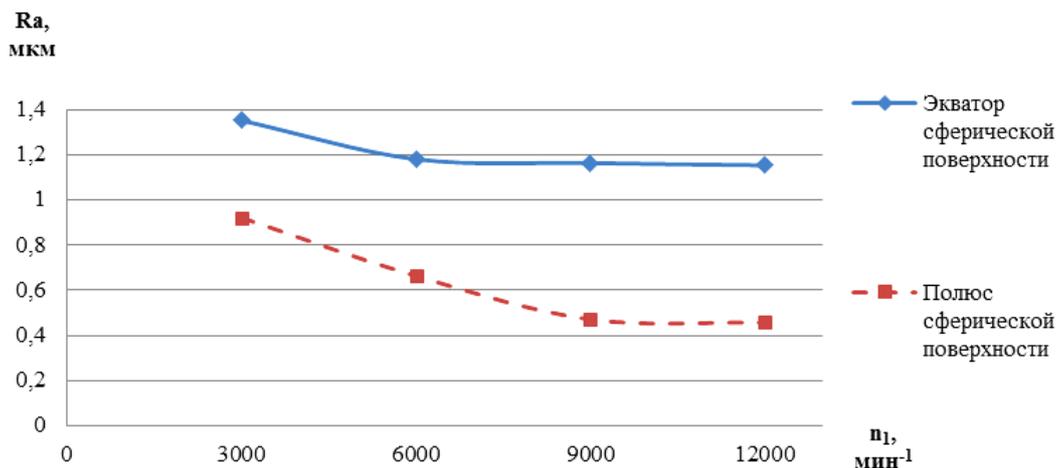


Рисунок 3. – Зависимость шероховатости обработанной сферической поверхности диаметром 35 мм от частоты вращения инструмента

Из графика видно, что 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 обработки.

Точность геометрической формы сферической поверхности может быть оценена при помощи кругломера или микрометра. Использование микрометра позволяет проводить определение точности отклонения формы обработанной сферической поверхности непосредственно на станке, для этого необходимо произвести измерения в плоскости, определяющей её «сжатость», так называемый «диаметральный размер», и в других четырёх плоскостях, определяющих отклонение размеров сферы в этих плоскостях от диаметрального размера. Схемы измерений представлены на рисунке 4.

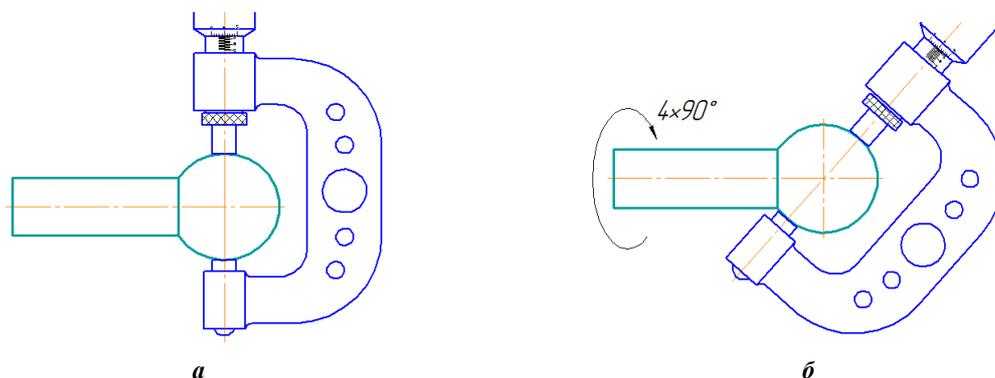


Рисунок 4. – Схемы измерения диаметрального размера (а) и размера в 4-х сечениях (б)

Результаты измерения точности обработанной сферической поверхности показали, что отклонение размеров диаметров находится в пределах 0,05 мм.

Типовые технологические маршруты таких часто встречающихся деталей, как шаровой палец опоры автомобиля и пробка шарового крана, с использованием комбинированной скоростной лезвийной обработки неполных сферических поверхностей в единичном и мелкосерийном производствах с исполь-

зованием модернизированного универсального оборудования будут состоять как минимум из 3 операций, приведенных в таблице 2.

Таблица 2. – Типовые технологические маршруты скоростной обработки деталей с неполными сферическими поверхностями

Наименование операции, оборудование, инструмент, наименование перехода	Получаемая форма на операции при обработке	
	шаровой палец опоры автомобиля	пробка шарового крана
1	2	3
1. <i>Заготовительная</i> Станок: отрезной или токарный. Инструмент: стандартный. Получение заготовки из проката с требуемыми размерами $D$ и $l$		
2. <i>Токарная</i> Станок: токарный. Инструмент: стандартный. Обработка всех поверхностей детали с обеспечением размеров по чертежу за исключением участка с неполной сферической поверхностью, на котором производится снятие фасок		
3. <i>Комбинированная скоростная</i> Станок: шлифовально-заточной. Инструмент: специальный лезвийный инструмент для скоростной обработки неполных сферических поверхностей, оснащенный пластинами твердого сплава с многослойными покрытиями, кубическим нитридом бора (КНБ) или минералокерамикой. Комбинированная скоростная обработка неполной сферической поверхности с получением требуемых размеров $D_{сф}$ и $H$ .		

В качестве заготовок в представленных типовых процессах выбраны пруток для шарового пальца опоры автомобиля и толстостенная труба для пробки шарового крана.

В случаях необходимости проведения термической обработки комбинированную скоростную операцию разбивают на предварительную и окончательную. На окончательной операции сферическая поверхность вместо шлифования доводится с использованием комбинированной скоростной лезвийной обработки. Используется специальный режущий инструмент, оснащенный пластинами из КНБ или минералокерамики.

**Заключение.** На основании результатов проведенного исследования по разработке технологии обработки неполных сферических поверхностей деталей машин сделаны следующие *выводы*:

- *разработан* технологический маршрут изготовления деталей с неполными сферическими поверхностями, включающий операцию комбинированной скоростной обработки. Эта операция отличается последовательностью реализации движений резания и съема припуска в зависимости от формы заготовки, предложенным диапазоном скорости резания;

- *предложены* конструкции составных и сборных режущих инструментов, позволяющих обрабатывать неполные сферические поверхности деталей машин в диапазоне диаметров 10...70 мм с высокой точностью и качеством;

- произведена модернизация универсального заточного станка модели 3М642 путем включения в электрические цепи приводов инструмента и детали датчиков обратной связи по скорости, программируемого логического контроллера, коммутационных устройств для управления двигателями приводов, блока питания и панели оператора. Это позволяет без сложных систем ЧПУ управлять бесступенчато частотой вращения приводов и измерять мощность резания;

- предложены формулы для расчёта частоты вращения инструмента и заготовки, что позволяет определить рациональные диапазоны режима резания с учётом заданной шероховатости поверхности и геометрических параметров детали;

- предложена на операции контроля точности формы схема измерения с использованием микрометра, что позволяет реализовать её в условиях единичного и мелкосерийного производства. Результаты измерений точности и шероховатости сферической поверхности детали после комбинированной скоростной обработки позволяют рекомендовать её вместо шлифования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иллюстрированный определитель деталей общемашиностроительного применения : руководящий техн. материал : кл. 40 и 50 общесоюз. классификатора пром-сти и с.-х. продукции. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 238 с.
2. Хмельницкий, Р.С. Исследование процесса обработки сферических поверхностей деталей способом охватывающего фрезерования / Р.С. Хмельницкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. Промышленность. – 2007. – № 8. – С. 53–58.
3. Научно-образовательный курс. Высокоскоростная обработка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [bmstu.ru/content/image/files/novo.doc](http://bmstu.ru/content/image/files/novo.doc). – Дата доступа: 29.10.2017.
4. Попок, Н.Н. Моделирование влияния шероховатости сферической поверхности детали на выбор скорости подачи вращающегося режущего инструмента / Н.Н. Попок [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. Промышленность. – 2016. – № 3. – С. 28–38.
5. 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.
6. Попок, Н.Н. Комплексные исследования физических и технологических характеристик процесса обработки сферических поверхностей деталей [и др.] // Вестн. Белорусско-Российского ун-та. – 2017. – № 2 (55). – С. 87–97.
7. 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 Полоц. гос. ун-та. Вып. 15 (85). Промышленность. Машиностроение. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – С. 165–168.
8. 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 междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апреля 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Российской Фед., Белорусско-Российский ун-т ; редкол. : И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорусско-Российский ун-т, 2017. – С. 41–42.

Поступила 02.02.2018

#### PROCESSING TECHNOLOGY FOR PARTIAL SPHERICAL SURFACES OF MACHINE PARTS

*N. POPOK, R. HMELNICKY, V. ANISIMOV*

*A technological route for obtaining partial spherical surfaces of machine parts using various methods of combined high-speed blade machining is presented. The design of special multi-blade cutting tools and the modernization option for a universal grinding machine for the implementation of combined high-speed machining are described. The algorithm for setting cutting conditions for processing partial spherical surfaces with providing Ra of the surface roughness in the range of 0.4...1.2 μm and deviation of the geometric shape is not more than 0.05 mm is provided.*

**Keywords:** *partial spherical surface, technology, rapid cutting, multi-blade cutting tool, improved cutting machine, roughness, accuracy.*