

УДК.621.91.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СПОСОБОМ ОХВАТЫВАЮЩЕГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ

(Полоцкий государственный университет)

Определены основные тенденции развития станкостроения и инструментаобеспечения; рассмотрены возможности применительно к механической обработке сферических поверхностей деталей. Приведен сравнительный анализ способов обработки сферических поверхностей по производительности. Описан процесс высокоскоростного фрезерования сферических поверхностей деталей. Представлены формулы для настройки лезвий инструмента и установки инструмента относительно оси заготовки. Выведена формула для расчета частоты вращения заготовки относительно частоты вращения инструмента при высокоскоростном фрезеровании сферических поверхностей деталей. Получена зависимость для определения угла, определяющего положение кинематической системы координат. Проведен анализ изменения главных переднего и заднего углов лезвия инструмента в процессе высокоскоростного фрезерования сферических поверхностей. Полученные результаты позволяют обеспечить высокую производительность и качество изготовления деталей со сферическими поверхностями.

Введение. Машиностроение является ключевой отраслью промышленности, так как без использования его возможностей по изготовлению необходимых деталей, изделий, оборудования и т.п. не может обойтись ни одна другая отрасль. Так, например, в таких отраслях, как нефтехимическая, автомобилестроение и станкостроение, широко применяются детали со сферическими поверхностями: шаровые опоры, пробки шаровых кранов, толкатели, рукоятки и др. Существует проблема обработки таких деталей с заданной производительностью и требуемым качеством при минимально возможных производственных затратах. В зависимости от этих требований разрабатывается технологический процесс обработки, выбирается оборудование и режущий инструмент.

Анализ тенденции развития машиностроения показывает [1 – 3], что предприятия стремятся к применению металлорежущих станков и инструментов, состоящих из взаимозаменяемых конструктивных модулей, позволяющих быстро адаптировать их к производству новой продукции и к новым технологическим процессам. При этом важным фактором повышения эффективности производства является режущий инструмент, доля которого в себестоимости металлообработки, с одной стороны, редко превышает 5 %, но, с другой стороны, от его выбора существенно зависят показатели технологического процесса.

Сравнение способов обработки сферических поверхностей по производительности. Проведенный анализ [4], показывает, что при обработке сферических поверхностей деталей машиностроения в основном используются способы обработки либо на специальных станках, либо при помощи специального инструмента. В случае обработки широкой номенклатуры и большого диапазона обработки сферических поверхностей необходимо применять либо специальные станки, либо проектировать дополнительную технологическую оснастку, или большое количество специальных режущих инструментов, приводящих к повышению себестоимости механической обработки детали. Причем обработка при помощи копировальных устройств имеет недостаточную точность. А для получения сферической поверхности с определенными геометрическими характеристиками необходим инструмент с такими же жестко заданными характеристиками, которые сложны и трудоемки в изготовлении.

В качестве *примера* проведем сравнение способов механической обработки сферических поверхностей по производительности при обработке детали «шаровая опора» из материала Сталь 45 (диаметр сферической поверхности $D = 30$ мм):

- 1) фасонным резцом методом врезания;
- 2) контурным резцом методом совмещения двух подач на станке с ЧПУ;
- 3) фрезой методом совмещения двух вращений на фрезерном станке.

Примем для всех способов припуск обрабатываемой сферической поверхности 2 мм, материал режущей части инструмента – Т15К6.

Так как производительность – это отношение объема снимаемого материала ко времени обработки, то рассчитаем объем снимаемого материала V по формуле (1):

$$V = V_{\text{заг}} - V_{\text{дет}} = \frac{4\pi}{3}(R_{\text{заг}} - R_{\text{дет}})^3 = \frac{4 \cdot 3,14}{3}(17 - 15)^3 = 33,5 \text{ (мм}^3\text{)}, \quad (1)$$

и назначим режимы резания для каждого способа (таблица).

Режимы резания

Способ обработки	Режимы резания			Основное время, T_0 , мин
	S , мм/об	n , мин ⁻¹	V , м/мин	
Фасонным резцом методом врезания	0,05	500	47,1	0,1
Контурным резцом методом совмещения двух подач	0,4	800	75,4	0,18
Фрезой методом совмещения двух вращений	0,72*	1600	150,7	0,08

* – число зубьев фрезы равно 4.

Рассчитанная производительность способов механической обработки сферической поверхности представлена в виде диаграммы на рисунке 1.

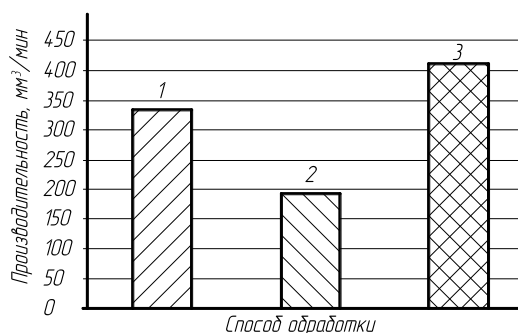


Рис. 1. Производительность способов механической обработки сферических поверхностей

движения заготовки и инструмента, т.е. кинематикой процесса, что позволяет получить сферические поверхности высокого качества и точности.

Процесс высокоскоростного фрезерования сферических поверхностей. Схема обработки сферических поверхностей способом высокоскоростного охватывающего фрезерования представлена на рисунке 2.

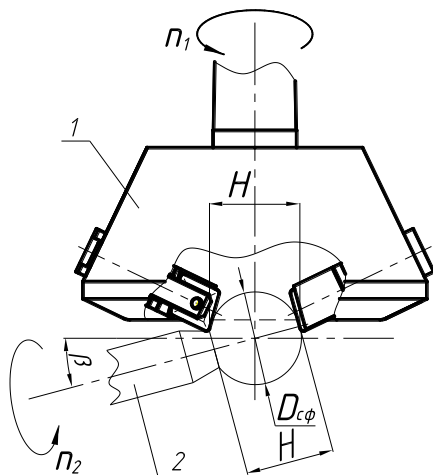


Рис. 2. Схема обработки сферической поверхности способом высокоскоростного фрезерования:

1 – режущий инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; n_1 – частота вращения инструмента; n_2 – частота вращения обрабатываемой заготовки; $D_{сф}$ – диаметр обрабатываемой сферической поверхности; H – высота сферической поверхности; D – диаметр настройки фрезы; β – угол установки оси вращения обрабатываемой заготовки

Как видно из диаграммы (см. рис. 1), способ обработки фрезой методом совмещения двух вращений является наиболее производительным.

Учитывая современное направление развития машиностроительного производства в область высокоскоростной обработки металлов резанием, данный способ механической обработки сферических поверхностей может оказаться более эффективным по сравнению с существующими методами.

Одно из самых важных преимуществ данного способа, в отличие от других, заключается в том, что точность формообразования сферической поверхности определяется не профилем инструмента и точностью поворотного приспособления, а точностью траектории

В данном способе обработки инструменту сообщают вращательное движение с частотой вращения n_1 . После установочного движения заготовки в рабочее положение, в результате которого происходит врезание в нее лезвия инструмента, заготовке сообщается вращательное движение вокруг собственной оси с частотой вращения n_2 . В отличие от известных способов обработки, диапазон частоты вращения n_1 находится в области высоких скоростей, начиная с 3000 мин⁻¹ и более. В результате вращения инструмента и одного оборота заготовки происходит полная обработка сферической поверхности.

Для обработки сферической поверхности диаметром $D_{сф}$ и высотой H необходимо произвести предварительную настройку инструмента на диаметр D и установку оси заготовки относительно оси инструмента на угол $90^\circ + \beta$, которые определяются по следующим формулам:

$$D = \sqrt{D_{сф} H}; \quad (2)$$

$$\beta = \arccos \sqrt{\frac{H}{D_{сф}}}. \quad (3)$$

Рассчитаем частоту вращения обрабатываемой заготовки в зависимости от частоты вращения инструмента. Исходными данными для расчета являются: диаметр сферической поверхности $D_{сф}$, подача на оборот S_0 , частота вращения инструмента n_1 .

За один оборот фрезы происходит ее подача по длине окружности L ($L = \pi D_{сф}$) сферической поверхности, равная S_o , за n оборотов инструмента происходит полная обработка сферической поверхности. Отсюда следует, что для обработки одной заготовки понадобится n оборотов инструмента:

$$n = \frac{L}{S_o} = \frac{\pi D_{сф}}{S_o}. \quad (4)$$

При n_1 оборотов фрезы происходит n_2 оборотов заготовки, следовательно

$$n_2 = \frac{n_1}{n}. \quad (5)$$

Подставив выражение (4) в (5), получим:

$$n_2 = \frac{n_1 S_o}{\pi D_{сф}}. \quad (6)$$

При фрезеровании различают подачу на один зуб S_z , подачу на оборот фрезы S_o и минутную подачу S_m , которые имеют между собой следующую зависимость $S_m = S_o n = S_z z n$ [5, с. 282]. Как известно [6, с. 142; 7, с. 181 – 183], увеличение скорости резания приводит к увеличению мощности резания. Поэтому при высокоскоростной обработке при увеличении частоты вращения уменьшают подачу на оборот, хотя при этом минутная подача возрастает. На рисунке 3 представлена зависимость производительности от частоты вращения, с учетом изменения подачи при обработке детали «шаровая опора», на сферической поверхности которой сравнивались способы механической обработки.

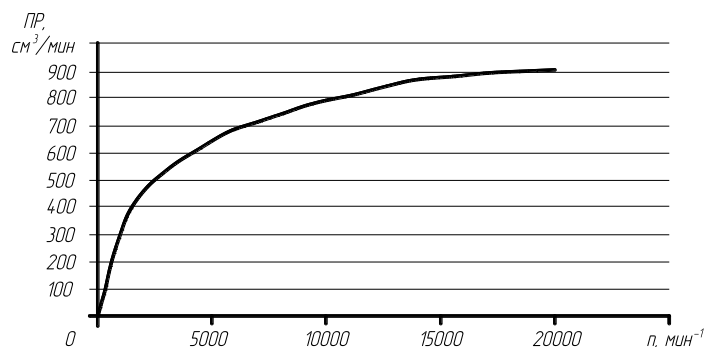


Рис. 3. Зависимость производительности от частоты вращения

Из рисунка 3 видно, что при увеличении частоты вращения, хотя и с уменьшением подачи, производительность растет. Но при частоте вращения выше 15000 мин⁻¹ производительность растет незначительно. Отсюда можно сделать вывод, что при высокоскоростной обработке с точки зрения производительности не всегда нужно стремиться к увеличению скорости резания, так как при ее увеличении возрастают силы резания, для уменьшения которых нужно снижать подачу, а, с другой стороны, подача оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности.

Анализ изменения углов лезвия инструмента в процессе высокоскоростного фрезерования сферических поверхностей. В результате относительных рабочих движений инструмента и обрабатываемой поверхности в процессе резания при обработке сферических поверхностей деталей, как и при обработке других поверхностей, геометрические параметры режущего лезвия инструмента отличаются от его геометрии, достигаемой при изготовлении. Перед тем как приступить к проектированию новой конструкции режущего инструмента для высокоскоростной обработки сферических поверхностей, необходимо провести анализ геометрии режущей части инструмента, для нахождения оптимальных углов резания. Поэтому анализ геометрии режущей части инструмента является исключительно важной теоретической и практической задачей.

Для рассмотрения изменения углов в процессе резания расположим инструмент и обрабатываемую заготовку в статической системе координат с началом в рассматриваемой точке M режущей кромки (рис. 4). Из рассматриваемой точки M режущей кромки проведем вектор скорости главного движения $\vec{V}$, касательный вектор $\vec{\tau}$ и вектор нормали $\vec{n}$ к поверхности резания. Перпендикулярно этим векторам располагаются соответственно основная плоскость P_v , секущая плоскость P_τ и плоскость резания P_n , а также векторы скорости вращения инструмента $\vec{V}_1$ и обрабатываемой детали $\vec{V}_2$, которые находятся в плоскости резания P_n .

Результирующий вектор скорости резания $\bar{V}_\rho$ будет равен:

$$\bar{V}_\rho = \bar{V}_1 + \bar{V}_2. \quad (7)$$

Обозначим координаты начала и конца векторов соответственно (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) . Так как в нашем случае векторы $\bar{V}_1$ и $\bar{V}_2$ находятся в одной плоскости P_n , то координату z не учитываем.

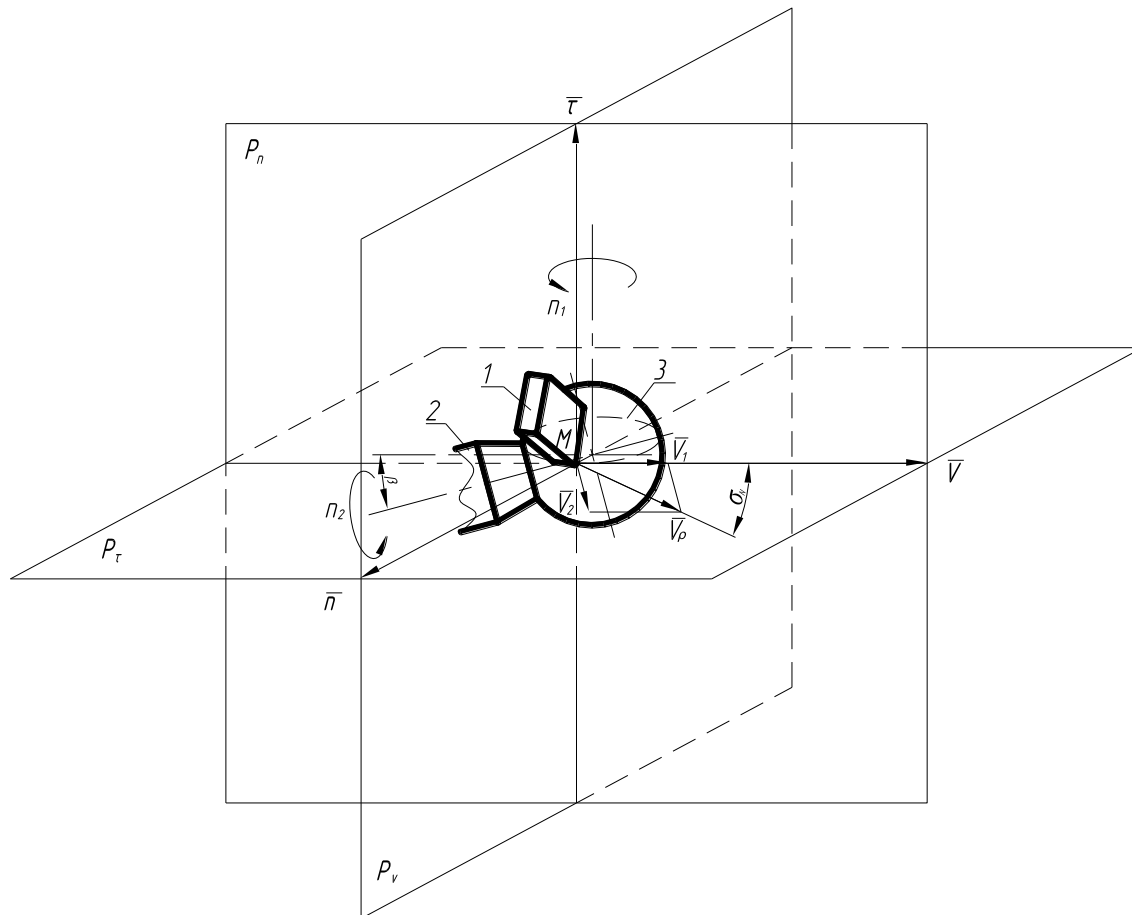


Рис. 4. Схема обработки неполной сферической поверхности в статической системе координат:
1 – режущая пластина инструмента; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – траектория резания;
 β – угол установки оси вращения обрабатываемой заготовки

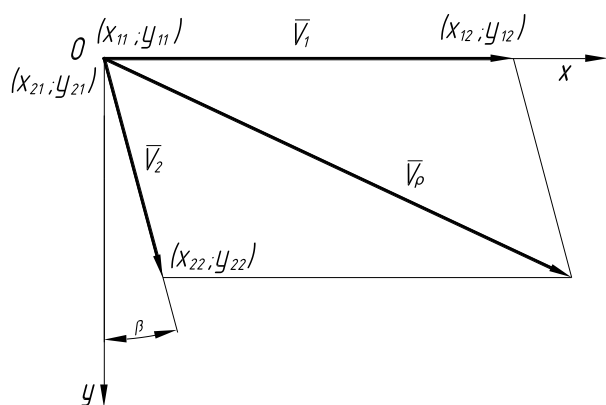


Рис. 5. Определение координат векторов

Координаты векторов $\bar{V}_1$ и $\bar{V}_2$ соответственно равны $a_1 = x_{12} - x_{11}$; $a_2 = y_{12} - y_{11}$ и $a_2 = x_{22} - x_{21}$; $a_2 = y_{22} - y_{21}$ (см. рис. 4).

Из рисунка 5 видно, что $x_{11}, y_{11}, x_{21}, y_{21}$ равны нулю, $x_{12} = \bar{V}_1$; $y_{12} = 0$; $x_{22} = |\bar{V}_2| \sin \beta$; $y_{22} = |\bar{V}_2| \cos \beta$. Тогда координаты векторов будут иметь следующие значения $\bar{V}_1 (|\bar{V}_1|; 0)$ и $\bar{V}_2 (|\bar{V}_2| \cos \beta; |\bar{V}_2| \sin \beta)$. Следовательно, результирующий вектор скорости резания будет иметь координаты: $\bar{V}_\rho (|\bar{V}_1| + |\bar{V}_2| \cos \beta; |\bar{V}_2| \sin \beta)$.

Абсолютная величина вектора $\bar{V}_\rho$:

$$\bar{V}_\rho = \sqrt{(|\bar{V}_1| + |\bar{V}_2| \cos \beta)^2 + (|\bar{V}_2| \sin \beta)^2}. \quad (8)$$

Зная значение $\bar{V}_\rho$ и значение его проекции на основную плоскость в статической системе координат, можно найти угол σ_N , который будет определять положение кинематической системы координат:

$$\sigma_N = \arcsin \left(\frac{|V_2| \cos \beta}{V_\rho} \right). \quad (9)$$

Подставив формулу (8) в (9), получим:

$$\sigma_N = \arcsin \left(\frac{|V_2| \cos \beta}{\sqrt{(|V_1| + |V_2| \cos \beta)^2 + (|V_2| \sin \beta)^2}} \right). \quad (10)$$

Из рисунка 6 видно, что кинематические передний и задний углы инструмента можно найти из следующих выражений:

$$\gamma_k = \gamma_{cm} + \sigma_N; \quad (11)$$

$$\alpha_k = \alpha_{cm} - \sigma_N, \quad (12)$$

где γ_k и γ_{cm} – главный передний угол соответственно в кинематической и статической системах координат; α_k и α_{cm} – главный задний угол в кинематической и статической системах координат соответственно.

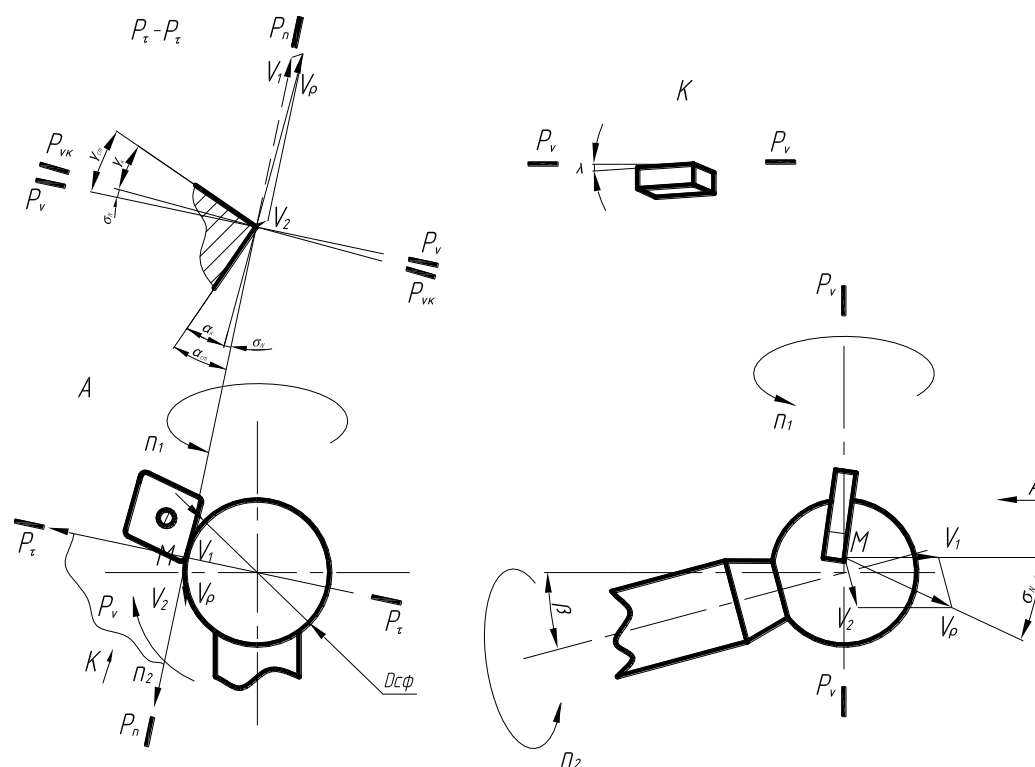


Рис. 6. К определению кинематических углов

В формулу (11) значение главного переднего угла надо подставлять с учетом знака, который он имеет в статической системе координат.

Определив значение угла σ_N из формулы (10) при обработке сферической поверхности детали «шаровая опора» с диаметром 30 мм и скоростью резания до 2000 м/мин и подставив его в формулы (11) и (12), получим изменение главного переднего γ (при положительном значении γ) и главного заднего α углов в процессе резания от скорости резания (рис. 7), при отрицательном значении главного переднего угла γ (рис. 8). На графике значение углов лезвия даны в приращениях к значению угла в статике.

Из графика изменения главного переднего γ и главного заднего α углов режущего лезвия инструмента для обработки сферических поверхностей деталей (см. рис. 7 и 8) видно, что с увеличением скорости резания главный задний угол α уменьшается, а главный передний угол γ в зависимости от того, какое значение он имеет (положительное или отрицательное), увеличивается или уменьшается соответственно. Но изменение углов в процессе обработки не превышает 0,25 градуса.

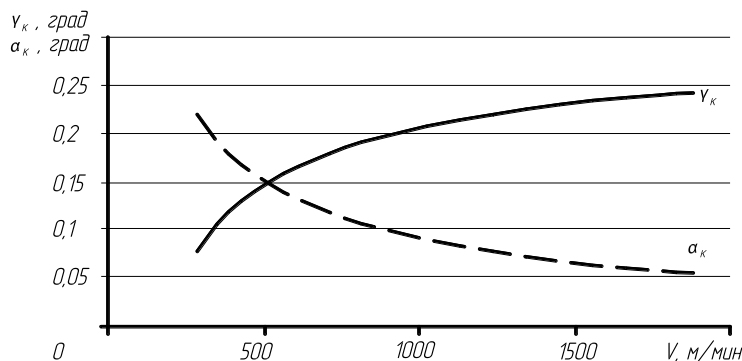


Рис. 7. Зависимость изменения углов положительного γ и α от скорости резания

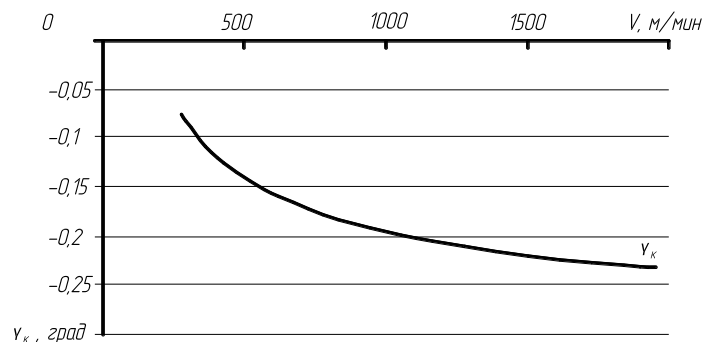


Рис. 8. Зависимость отрицательного γ от скорости резания

Отсюда можно сделать **вывод**, что при высоких скоростях резания изменение углов хотя и не значительное, всего в пределах 0,25 градуса, но и эти незначительные отклонения углов могут оказать существенное влияние на процесс обработки сферической поверхности. При этом следует отметить, что большое влияние на углы лезвия оказывает угол установки инструмента относительно обрабатываемой заготовки. В вышерассмотренном примере угол установки оси инструмента относительно оси обрабатываемой заготовки определяли условием обработки заданной сферической поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н.Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н.Н. Попок. – Минск: Технопринт, 2001. – 369 с.
2. Черпаков, В.И. Тенденции развития мирового станкостроения в начале XXI века / В.И. Черпаков // СТИН. – 2003. – № 9. – С. 3 – 7.
3. Черпаков, В.И. Тенденции развития мирового станкостроения в начале XXI века // СТИН. – 2003. – № 10. – С. 3 – 7.
4. Анализ способов обработки сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок [и др.] // Вестн. Полотц. гос. ун-та. Сер. Прикладные науки. – 2006. – № 12. – С. 42 – 45.
5. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
6. Ящерицин, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицин, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск: Новое издание, 2005. – 512 с. (Техническое образование).
7. Попок, Н.Н. Теория резания: учеб. пособие для студ. машиностр. спец. / Н.Н. Попок. – Новополоцк: ПГУ, 2006. – 228 с.

Поступила 17.07.2007