

УДК 621.9.04

doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-19-28

Новый подход к трехкоординатному фрезерованию крупногабаритных поверхностей второго порядка

С.Н. Саяпин^{1,2}, О.О. Брындина¹, П.Г. Ванина¹

¹ ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

New Approach to Three-Coordinate Milling of Large-Sized Surfaces of Second Order

S.N. Sayapin^{1,2}, O.O. Bryyndina¹, P.G. Vanina¹

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

² Bauman Moscow State Technical University

Предложен новый подход к прецизионной обработке крупногабаритных поверхностей второго порядка на трехкоординатном горизонтально-фрезерном станке. Новая технология не требует применения уникальных крупногабаритных токарно-карусельных или пятикоординатных фрезерных станков. Трехкоординатные горизонтально-фрезерные станки не нужно оснащать дополнительной оснасткой, обеспечивающей заготовке недостающие вращательное и поступательное перемещения относительно рабочего стола станка. Предлагаемая технология основана на новом подходе, объединяющем геометрические параметры обрабатываемой поверхности второго порядка, сферической поверхности режущего инструмента (фрезы) и их взаимное расположение относительно рабочего стола. Применение разработанной технологии позволит повысить эффективность и точность обработки поверхности второго порядка, а также упростить управляющую программу и технологическую оснастку благодаря отсутствию подвижной оснастки. Приведен пример практического использования нового подхода к фрезерованию крупногабаритных поверхностей второго порядка. Показана возможность независимого контроля геометрии обработанной параболической поверхности с помощью трехкоординатного горизонтально-фрезерного станка.

Ключевые слова: поверхности второго порядка, трехкоординатное фрезерование, параболическая поверхность, контроль геометрии

The study introduces a new approach to precision machining of large-sized surfaces of second order on a three-coordinate horizontal milling machine. The new technology does not require the use of unique large-size boring lathes or five-axis milling machines. Three-axis horizontal milling machines do not need to be equipped with additional equipment that provides the workpiece with the missing rotational and translational movements relative to the machine table. The proposed technology is based on the use of a new approach that combines the geometric parameters of the second-order machined surface, the spherical surface of the cutting tool, i.e. cutter, and their position relative to the working table. The use of the developed technology will improve the efficiency and accuracy of machining the surface of second order, as well as simplify the control program and technological support due to the absence of movable equipment. The study gives an example of practical implementation and shows the possibility of independent control of the machined parabolic surface geometry using a three-coordinate horizontal milling machine.

Keywords: surfaces of the second order, three-coordinate milling, parabolic surface, geometry control

Известны шесть типов поверхностей второго порядка (ПВП) (рис. 1).

Крупногабаритные ПВП широко применяют в архитектуре, инженерных конструкциях и машиностроении. Габаритные размеры ПВП могут достигать сотен метров. Примерами высокоточных крупногабаритных ПВП могут служить зеркальные параболические антенны радиотелескопов (РТ), рабочие поверхности которых набраны из групп однотипных щитов (фацет) с точностью изготовления их поверхности от десятков до сотен микрон (рис. 2).

Изготовление подобных поверхностей сопряжено с технологическими трудностями, связанными, прежде всего, с выбором технологического оборудования для механической обработки крупногабаритных параболических фацет, на котором должны быть изготовлены сотни и тысячи таких изделий. Рассмотрим станочное оборудование, пригодное для этой цели.

Описание технологий, применяемых для механической обработки ПВП. В настоящее время механическая обработка высокоточных ПВП на крупногабаритных деталях диаметром более 5 м осуществляется на токарно-карусельных станках и фрезерных станках с ЧПУ [1–7].

При обработке ПВП на токарно-карусельном станке заготовке сообщают вращение, а резцу — перемещение в вертикальной плоскости по двум координатам [1–6]. Недостатками такого способа обработки являются: уникальность оборудования; ограничение размеров

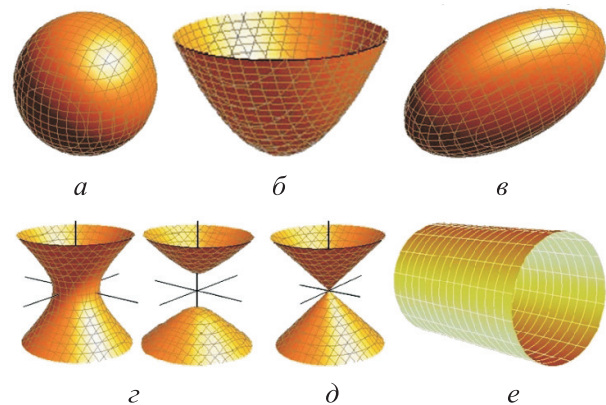


Рис. 1. Внешний вид ПВП разного типа: а — сфера; б — параболоид; в — эллипсоид; г — гиперboloиды; д — конус, е — цилиндр

ПВП двойной кривизны, так как максимальный диаметр заготовки не должен превышать 22 м; значительный холостой ход при обработке несимметричной вырезки, если размеры последней достигают нескольких метров, и она расположена на периферийной части ПВП.

Примеры крупнейших в мире уникальных отечественных токарно-карусельных универсальных станков-гигантов КУ 299 и КУ 466, изготовленных на Коломенском заводе тяжелого машиностроения (ныне ЗАО «Коломенский завод тяжелых станков») приведены на рис. 3.

Максимальный диаметр обрабатываемой заготовки для станка КУ 299 составлял 20 м (при отодвинутом портале), для станка КУ 466 — 22 м (при использовании приспособления, увеличивающего опорную поверхность планшайбы). В 1970 г. станок КУ 299 был поставлен в Японию для фирмы Hitachi, а созданный сов-

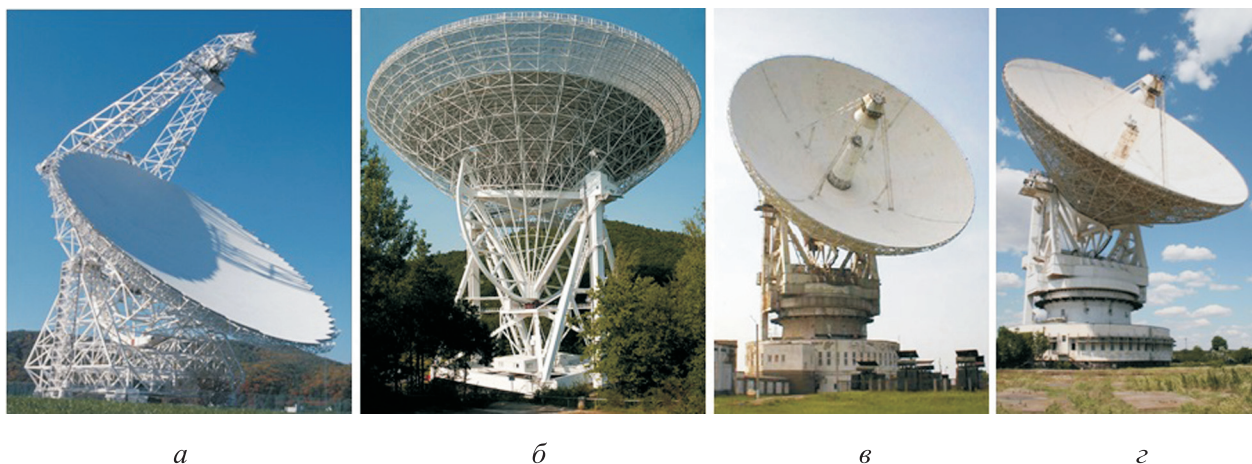


Рис. 2. Внешний вид крупнейших в мире зеркальных параболических антенн РТ: а — РТ Green Bank (США), 100×110 м (вырезка из параболоида вращения из 2004 панелей); б — РТ 100 (Бонн, ФРГ, диаметр 100 м); в — РТ 70 (Уссурийск, РФ, диаметр 70 м); г — РТ 70 (Евпатория, РФ, диаметр 70 м)

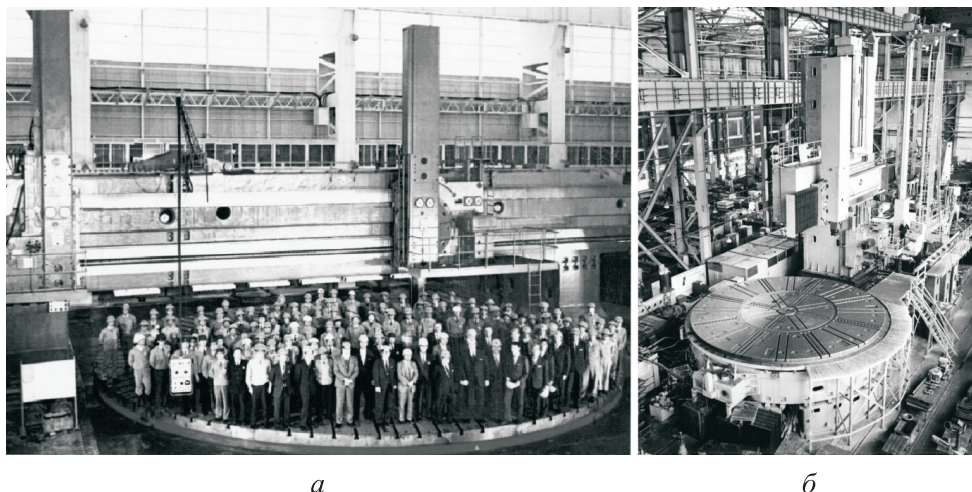


Рис. 3. Внешний вид токарно-карусельных станков-гигантов КУ 299 (а) и КУ 466 (б)

местно с фирмой Schiess станок КУ 466 — в г. Волгодонск для Атоммаша [5].

В настоящее время самым большим токарно-карусельным станком, выпускаемым ЗАО «Коломенский завод тяжелых станков», является многоцелевой одностоечный станок с ЧПУ модели КУ1К580Ф4. Этот станок с планшайбой стола диаметром 8 м способен обрабатывать заготовки диаметром до 18 м [6].

Если диаметр исходного параболоида вращения превышает 18 м, то механическую обработку его высокоточных параболических фасет можно выполнять на пятикоординатном фрезерном станке. При обработке ПВП на пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ фреза получает по программе одновременно три линейных перемещения и два вращательных движения [1–4, 7–11].

Однако из-за уникальности этих станков (способности обрабатывать крупногабаритные ПВП) и чрезвычайно высокой стоимости обработки их применение крайне затруднено. В качестве примера на рис. 4 приведен высокоскоростной пятикоординатный обрабатывающий центр МЦ-2 производства Савеловского машиностроительного завода (г. Кимры), способный проводить прецизионную обработку крупногабаритных ПВП. Максимальные перемещения по координатам X , Y и Z составляют 6000, 3000 и 1000 мм соответственно [7].

Более доступны трехкоординатные фрезерные станки с ЧПУ, оснащенные специальным устройством для сообщения заготовке вращения и линейного перемещения [4]. На рис. 5 показана схема расположения обрабатываемого участка матрицы в виде несимметричной вы-

сечки из параболоида вращения $1-1'-1''-1'''$ на трехкоординатном фрезерном станке, в котором режущий инструмент по программе получает одну угловую и две линейные подачи в вертикальной плоскости X_0OZ_0 . Две недостающие (линейную и угловую) подачи заготовке обеспечивает специальный поворотный стол. На рис. 5 ось X'_0O' параллельна оси X_0O , а ось Z_1A — Z_0O .

Поворотный стол обеспечивает заготовке поворот вокруг оси Z_1 , параллельной оси симметрии параболоида вращения, и линейное перемещение оси Z_1 вдоль оси, перпендикулярной вертикальной плоскости X_0OZ_0 . Ось Z_1 проходит через центр заготовки (точку A), которую устанавливают под углом α_{cp} к горизонту.

Торцовая цилиндрическая фреза, перемещаясь по образующим в меридиональных плоскостях заготовки, обрабатывает ПВП за несколько проходов. Между проходами заготовку перио-

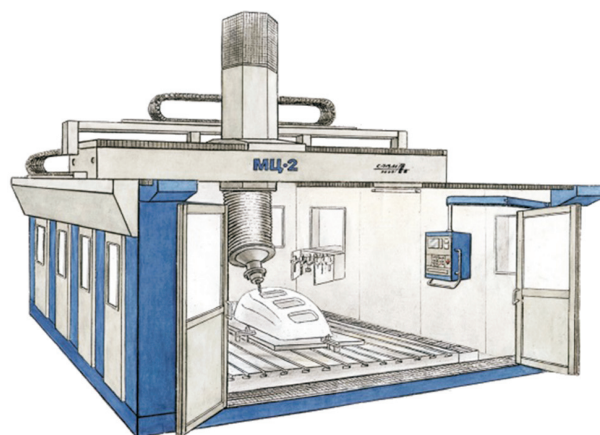


Рис. 4. Внешний вид высокоскоростного пятикоординатного обрабатывающего центра МЦ-2

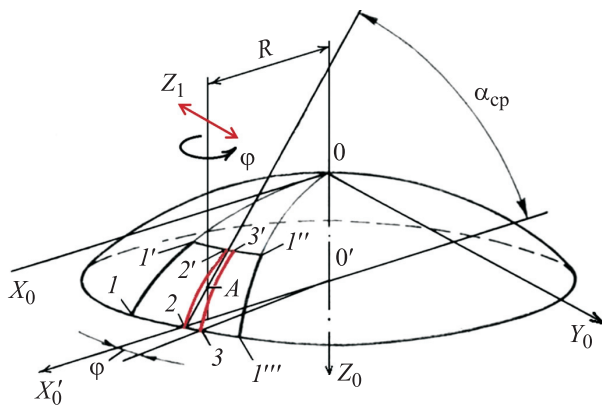


Рис. 5. Схема расположения обрабатываемого участка матрицы в виде параболоида вращения:
1-1'-1''-1''' — контуры параболоида вращения;
2-2', 3-3' — проходы инструмента

дически поворачивают на угол φ . После каждого поворота заготовки ось Z_1 перемещают в горизонтальной плоскости X_0OY_0 по координатам

$$X_0 = R \sin \varphi;$$

$$Y_0 = R(1 - \cos \varphi),$$

где X_0 и Y_0 — координаты оси Z_1 , вокруг которой поворачивают заготовку; R — расстояние от оси симметрии параболоида вращения до оси поворота заготовки (оси Z_1).

Технический контроль геометрии матрицы или отражательного щита необходимо проводить независимым способом со структурой погрешностей, отличной от таковой для обрабатываемого станка. В этих целях могут быть применены оптические лазерные головки, устанавливаемые непосредственно на перемещаемые детали станка и развязанные от его конструкций по ошибкам.

Геометрию матрицы или отражательного щита также можно контролировать с помощью плоских ножевых меридиональных или поперечных шаблонов с вогнутым или выпуклым параболическим профилем, точность которых должна быть на порядок выше требуемой для обрабатываемой поверхности.

Рабочий профиль меридионального шаблона (флаг-шаблона) представляет собой одну из ветвей кривой второго порядка, например, параболы, ось симметрии которой является прецизионной осью вращения шаблона и совпадает с фокальной осью обработанной параболической поверхности. Контроль поверхности осуществляют с помощью щупов после каждого поворота шаблона на заданный угол. Шаблоны такого типа характеризуются громоздкостью и

высокими требованиями к геометрической точности [4].

Также поверхность параболоида вращения можно получить, если образующую его главную параболу повернуть вокруг фокальной оси OZ на прямой угол и перемещать как «образующую» параболу параллельно самой себе (т. е. поступательно) таким образом, чтобы ее вершина скользила по главной (меридиональной) параболе как по направляющей. Тогда «образующая» параболы опишет параболоид вращения.

Все «образующие» параболы будут конгруэнтными и лежать на поверхности параболоида вращения (рис. 6, а) [12]. Это его свойство положено в основу контроля геометрии его поверхности с помощью более компактных поперечных шаблонов с параболическим профилем. При этом длина поперечного параболического шаблона не зависит от диаметра параболоида вращения и соизмерима с длиной периферийной хорды дуги 1-1''' (см. рис. 5).

Пример успешного практического применения такого шаблона при контроле отражающей поверхности щитов параболической антенны радиотелескопа РТ16 приведен в работе [13].

Рассмотренный способ обработки ПВП имеет ряд недостатков. Так, при выполнении двух

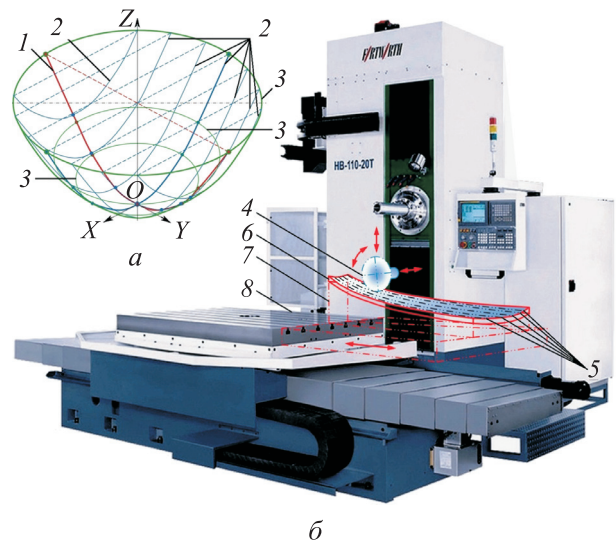


Рис. 6. Схемы параболоида вращения (а) и фрезерования его участка поверхности на трехкоординатном расточном станке с ЧПУ типа НВ-110-20Т (б):

1 — главная параболы (образующая); 2 — конгруэнтные параболы; 3 — соосные окружности, образованные меридиональными сечениями параболоида вращения; 4 и 5 — дисковая фреза и ее проходы в виде ветвей конгруэнтных парабол; 6 — стол; 7 — подставка; 8 — заготовка

смежных проходов обработанные участки перекрываются, что ведет к увеличению числа проходов. Добавление к четырем основным движениям (вращению фрезы, ее линейным перемещениям по двум координатам и перемещению заготовки по третьей координате) пятого — поворота заготовки относительно оси, параллельной оси симметрии ПВП, усложняет технологическую оснастку.

Более трудоемкой является разработка управляющей программы (УП), ее объем больше, чем в случае, когда траектория движения фрезы представляет собой окружность. Это обусловлено наличием программируемой подачи фрезы при обработке вогнутой ПВП и программируемого перемещения стола при фрезеровании выпуклой ПВП. Для достижения требуемой точности обработки необходимо обеспечить совпадение оси вращения фрезы с нормалью к ПВП в месте обработки, либо увеличить число проходов, что усложняет конструкцию специального устройства и приводит к повышенному износу фрезы.

Отмеченное ранее свойство параболоида вращения образовывать конгруэнтные параболы (см. рис. 6, а) при его сечении параллельными между собой и с фокальной осью плоскостями [12] можно использовать не только для контроля отражающей поверхности щитов параболической антенны с помощью плоского параболического поперечного шаблона [14], но и для непосредственной обработки параболической поверхности дисковой фрезой на трехкоординатном станке.

Пример практического применения технологии программной обработки дисковой фрезой параболической поверхности трапецидального сегмента на высокоточном обрабатывающем центре с ЧПУ типа СВРКФ 110/1 с шагом перемещения обрабатывающего инструмента 1 мкм приведен в работах [13, 15].

На рис. 6, б изображена схема фрезерования участка поверхности параболоида вращения на подобном трехкоординатном расточном станке с ЧПУ типа НВ-110-20Т. Разработанный алгоритм подготовки исходных данных для обрабатывающего центра позволил использовать только три координаты для перемещения инструмента станка, вместо четырех–пяти, что существенно снизило стоимость и время изготовления сегментов зеркала.

После выполнения дисковой фрезой 4 прохода 5 по параболической линии в меридио-

нальной плоскости за счет продольной подачи стола 6 с подставкой 7 и заготовкой 8 и одновременной вертикальной подачи шпинделя станка с фрезой (см. рис. 6, б) режущая кромка инструмента смещалась параллельно плоскости предыдущего его прохода вследствие поперечной подачи шпинделя станка.

После завершения всех проходов в параллельных плоскостях и получения параболической поверхности семейством конгруэнтных парабол дальнейшая обработка параболической поверхности прекращается. Точность фрезерования ПВП определяется толщиной дисковой фрезы и числом смежных проходов.

Рассмотренная технология имеет следующие недостатки:

- неравномерные износ и нагрев дисковой фрезы вследствие использования только одной из режущих кромок приводят к снижению точности обработки [16, 17]; также требуется увеличенное число проходов фрезы;
- максимальная стрела прогиба обрабатываемой параболической поверхности ограничена радиусом фрезы (с учетом геометрии шпинделя) и ее требуемой жесткостью.

Цель статьи — разработка нового способа обработки ПВП, обеспечивающего повышение ее эффективности, точности и упрощение конструкции оснастки.

Новый подход к трехкоординатному фрезерованию крупногабаритных ПВП.

Для устранения перечисленных недостатков предложен новый подход к фрезерованию крупногабаритных ПВП, в частности facets параболоида вращения, на трехкоординатном продольно-фрезерном станке с ЧПУ [18–20]. Такой подход не требует применения уникальных крупногабаритных токарно-карусельных или пятикоординатных фрезерных станков, а также дополнительных двухкоординатных приспособлений для трехкоординатных фрезерных станков. Технология обработки ПВП направлена на повышение точности, упрощение УП и специального устройства, а также уменьшение износа фрезы и сокращение времени фрезерования.

Обрабатываемый участок $ADFK$ параболоида вращения (рис. 7) с одной стороны ограничен ветвями парабол OA и OK , а с другой — дугами окружностей DF и AK . Параболоид вращения получен вращением ветви образующей параболы OM с вершиной в точке O вокруг фокальной оси OZ [21]. Угол α создан осью O_nX_n ,

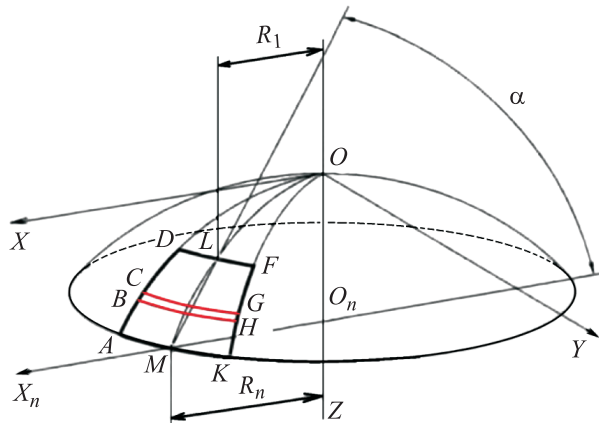


Рис. 7. Схема расположения обрабатываемого участка $ADFK$ параболоида вращения:
 OZ — ось симметрии параболоида вращения;
 L и M — середины дуг DF и AK соосных окружностей радиусами R_1 и R_n ; BH и CG — промежуточные проходы инструмента

параллельной оси OX , и хордой ML участка ветви образующей параболы OM , проходящей через середины дуг окружностей радиусами R_1 и R_n .

Обработка участка $ADFK$ осуществляется с заданным шагом по дугам соосных окружностей параболоида вращения AK , BH , CG , DF и т. д., полученных параллельными сечениями параболоида вращения плоскостями, перпендикулярными оси симметрии OZ .

Новый подход к фрезерованию крупногабаритных ПВП, в частности фасет параболоида вращения, рассмотрен на примере применения трехкоординатного продольно-фрезерного расточного станка с ЧПУ модели 6М616, внешний вид которого изображен на рис. 8, а. Схема расположения параболической поверхности заго-

товки при обработке концевой фрезой со сферической рабочей поверхностью приведена на рис. 8, б.

Перед началом фрезерования ПВП на столе 5 указанного станка размещают подставку 4, на которой под углом α (см. рис. 7 и 8, б) устанавливают заготовку 3. Обработка ПВП осуществляется по дугам 2 окружностей концевой фрезой 1 со сферической рабочей поверхностью радиусом r . При этом ось вращения фрезы параллельна оси симметрии ПВП OZ (см. рис. 7). Режущая часть фрезы может быть цельной или сборной.

В результате согласованных одновременных подач фрезы по оси OY и заготовки по оси OX (см. рис. 7) получают результирующую подачу формообразования, направленную по касательной к дуге окружности, образованной миделевым (поперечным) сечением параболоида вращения, перпендикулярным его оси симметрии.

Схема взаимного расположения концевой фрезы со сферической рабочей поверхностью радиусом r и меридионального профиля ПВП приведена на рис. 9. Соотношение подач фрезы и заготовки определяют по изменению координат точки K контакта сферической поверхности 2 концевой фрезы и обрабатываемой поверхности заготовки, лежащей на пересечении нормали $N-N$ к этим поверхностям с дугой окружности миделевого сечения ПВП.

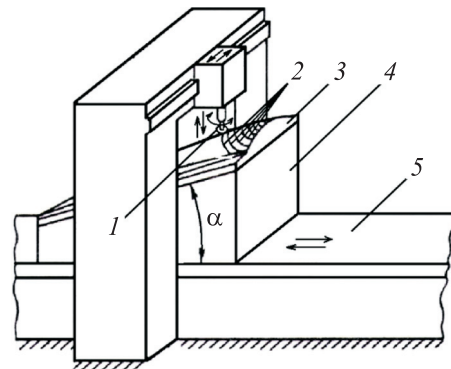
Радиус этой окружности на i -м проходе

$$R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2},$$

где x_i и y_i — координаты точки контакта на i -м проходе.



а



б

Рис. 8. Внешний вид трехкоординатного продольно-фрезерного расточного станка с ЧПУ модели 6М616 (а) и схема параболической поверхности заготовки при обработке концевой фрезой со сферической рабочей поверхностью (б)

За первый проход заготовку обрабатывают по дуге окружности радиусом R_1 , лежащей в сечении с координатой z_1 . После его окончания фреза перемещается согласно УП вдоль оси своего вращения, параллельной оси OZ , на величину $z_2 - z_1$, а заготовка — вдоль оси OX на величину $R_2 - R_1$.

За второй проход фреза перемещается по дуге окружности радиусом R_2 , лежащей в сечении с координатой z_2 . Обработка заканчивается на n -м проходе, когда точка O окажется в точке O' . При этом фреза перемещается по дуге окружности радиусом R_n , лежащей в сечении с координатой z_n . В случае необходимости перед чистовой обработкой можно провести черновую по соответствующей УП.

Точность обработки зависит от геометрических параметров концевой фрезы 1 со сферической рабочей поверхностью радиусом r и ПВП, образованной вращением линии 2 (образующей) вокруг оси OZ (рис. 10).

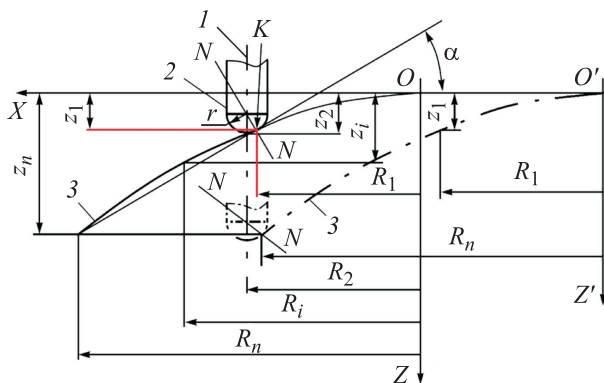


Рис. 9. Схема взаимного расположения фрезы и меридионального профиля ПВП:
 1 — ось вращения фрезы; 2 — концевая фреза со сферической рабочей поверхностью радиусом r ; 3 — проходы инструмента

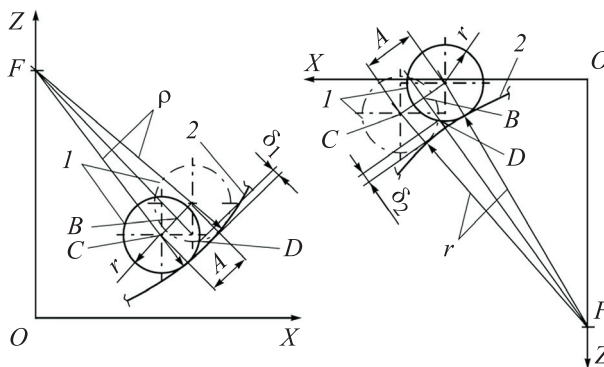


Рис. 10. Схемы для расчета отклонений вогнутой (а) и выпуклой (б) ПВП от теоретического профиля

Отклонение вогнутой ПВП от теоретического профиля (рис. 10, а)

$$\delta_1 = \rho - FB - BD;$$

$$FB = \sqrt{FC^2 - CB^2} = \sqrt{(\rho - r)^2 - (A/2)^2};$$

$$BD = \sqrt{r^2 - CB^2} = \sqrt{r^2 - (A/2)^2},$$

где ρ — радиус кривизны образующей ПВП; A — расстояние между положениями центра сферической поверхности фрезы на двух смежных проходах, $0 < A \leq 2r$.

Отклонение выпуклой ПВП от теоретического профиля (рис. 10, б)

$$\delta_2 = FB - \rho - BD;$$

$$FB = \sqrt{FC^2 - CB^2} = \sqrt{(\rho + r)^2 - (A/2)^2};$$

$$BD = \sqrt{r^2 - (A/2)^2}.$$

После подстановки выражений для FB и BD в формулы определения отклонений вогнутой и выпуклой ПВП от теоретического профиля получаем

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \rho - \sqrt{(\rho - r)^2 - (A/2)^2} - \sqrt{r^2 - (A/2)^2}; \\ \delta_2 &= \sqrt{(\rho + r)^2 - (A/2)^2} - \rho - \sqrt{r^2 - (A/2)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Реализуем предлагаемый способ на продольно-фрезерном расточном станке с ЧПУ модели 6М616 (с размером стола 1600×5000 мм и максимальной высотой обрабатываемой детали 1200 мм) при обработке вогнутой и выпуклой ПВП фрезой радиусом $r = 75$ мм с заданной точностью $\delta_1 = 0,08$ мм и $\delta_2 = 0,005$ мм при $\rho = 3000$ мм. Рассмотрим два смежных прохода с расстоянием $A = 6,0$ и $1,5$ мм соответственно при фрезеровании вогнутой и выпуклой ПВП. После подстановки значений параметров в формулы (1) получаем $\delta_1 = 0,0617$ мм и $\delta_2 = 0,0037$ мм.

Предложенная технология механической обработки рабочей ПВП позволяет применить круговую интерполяцию с шагом изменением радиуса дуги окружности прохода и высоты ее уровня относительно вершины ПВП, что существенно упрощает УП, особенно при фрезеровании параболической поверхности.

Новый способ был успешно применен при изготовлении параболической матрицы для формирования фацет из углепластика, образующих рабочую поверхность несимметричного параболического рефлектора, образованного пересечением параболоида вращения с фокус-

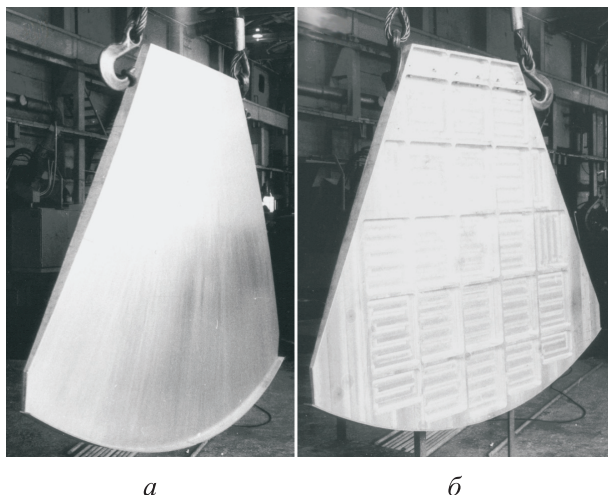


Рис. 11. Внешний вид рабочей (а) и тыльной (б) сторон высокоточной параболической поверхности матрицы после механической обработки на трехкоординатном продольно-фрезерном расточном станке с ЧПУ модели 6М616

ным расстоянием 3,5 м и цилиндра диаметром 3,5 м, ось которого расположена параллельно фокальной оси и смещена от нее на 2 м [22]. Для изготовления матрицы на карусельном станке потребовался бы станок с планшайбой диаметром 7,5 м.

Литература

- [1] Дальский А.М. ред. *Технология конструкционных материалов*. Москва, Машиностроение, 2005. 592с.
- [2] Groover M.P. *Fundamentals of modern manufacturing. Materials, processes, and systems*. Wiley, 2010. 1024 p.
- [3] Oberg E. *Machinery's handbook*. New York, Industrial Press, 2012. 2700 p.
- [4] Поляк В.С., Бервалдс Э.Я. *Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов*. Рига, Зинатне, 1990. 526 с.
- [5] Литвинов Н. Станки и прессы гиганты. *РИТМ*, 2014, № 6, с. 28–30.
- [6] *Станки-колонна-карусельные*. URL: <https://kzts.su/> (дата обращения 11 мая 2021).
- [7] МЦ-2 — Центр обрабатывающий высокоскоростной пятикоординатный. *mashinform.ru: веб-сайт*. URL: <https://mashinform.ru/oborudovanie-stanki/m/mtc-2.shtml> (дата обращения: 11.05.2021).
- [8] Apro K. *Secrets of 5-axis machining*. Industrial Press, 2008. 184 p.
- [9] Warkentin A., Bedi S., Ismail F. Five-axis milling of spherical surfaces. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1996, vol. 36, no. 2, pp. 229–243, doi: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)98763-W](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)98763-W)
- [10] Warkentin A., Ismail F., Bedi S. Comparison between multi-point and other 5-axis tool positioning strategies. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2000, vol. 40, no. 2, pp. 185–208, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00058-9)
- [11] Gray P.J., Warkentin A., Ismail F., et al. Graphics-assisted rolling ball-method for 5-axis surface machining. *Comput. Aided Des.*, 2004, vol. 36, no. 7, pp. 653–663, doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(03\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(03)00141-6)
- [12] Делоне Б.В., Райков Д.А. *Аналитическая геометрия*. Т. 2. Москва, Ленинград, Гостехиздат, 1949. 516 с.

Внешний вид рабочей (а) и тыльной (б) сторон изготовленной параболической матрицы показан на рис. 11.

Для контроля отклонений рабочей поверхности матрицы от теоретического профиля на последнем выбрали 40 случайных точек, рассчитали их координаты и разность значений координат соседних точек. Затем в шпиндель установили индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм, измерили относительные приращения координат соседних точек и сравнили с расчетной разностью значений.

При этом контроль точности поверхности проводили не по УП, а вручную с пульта. Наибольшее отклонение обработанной поверхности матрицы размером 1300×1800×70 мм от теоретической не превышало 0,05 мм, что соответствовало требуемой точности.

Вывод

Разработан новый способ обработки ПВП, позволяющий повысить ее эффективность и точность, а также упростить конструкцию специального устройства, так как отпала необходимость совершать дополнительные вращательное и поступательное перемещения ПВП

- [13] Вечтомов В.А., Голубцов М.Е., Можаров Э.О. Зеркальный коллиматор миллиметрового диапазона волн. *Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научное издание*, 2012, № 8, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-8-340>
- [14] Борисов А.А., Паршиков А.А. Конструкция, технология изготовления и методика контроля отражающей поверхности антенны радиотелескопа РТ-16 МГТУ. В: *Конструкции зеркальных антенн*. Ч. 1. Рига, Зинатне, 1990, с. 221–227.
- [15] Вечтомов В.А. Испытательный стенд бортовых антенн миллиметрового диапазона волн на основе зеркального коллиматора. *Решетневские чтения*, 2015, т. 1, с. 87–91.
- [16] Карпачев А.Ю. Собственные динамические характеристики вращающихся круглых пил при неравномерном нагреве. *Вестник машиностроения*, 2006, № 5, с. 32–36.
- [17] Карпачев А.Ю., Николаев С.М. Исследование динамических характеристик дисковой пилы с радиальными компенсаторами. *Вестник машиностроения*, 2013, № 12, с. 37–38.
- [18] Саяпин С.Н., Синев А.В. Способ обработки поверхности второго порядка и устройство для его осуществления. Патент РФ 2170161. Заявл. 25.05.1999, опубл. 10.07.2001.
- [19] Саяпин С.Н. Новый способ обработки поверхности второго порядка. *СТИН*, 2002, № 1, с. 30–32.
- [20] Саяпин С.Н. Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа. Дис. ... док. тех. наук. Москва, ИМАШ РАН, 2003. 446 с.
- [21] Беклемишев Д.В. *Курс аналитической геометрии и линейной алгебры*. Москва, Наука, 1984. 320 с.
- [22] Саяпин С.Н. Универсальный быстро собираемый параболический рефлектор с регулируемой поверхностью для работы в СВЧ диапазоне. *Вестник машиностроения*, 2013, № 11, с. 6–13.

References

- [1] Dal'skiy A.M. ed. *Tekhnologiya konstruksionnykh materialov* [Technology of construction materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 592 p. (In Russ.).
- [2] Groover M.P. *Fundamentals of modern manufacturing. Materials, processes, and systems*. Wiley, 2010. 1024 p.
- [3] Oberg E. *Machinery's handbook*. New York, Industrial Press, 2012. 2700 p.
- [4] Polyak V.S., Bervalds E.Ya. *Pretsizionnye konstruksii zerkal'nykh radioteleskopov* [Precision constructions of reflector radar telescope]. Riga, Zinatne Publ., 1990. 526 p. (In Russ.).
- [5] Litvinov N. Machine tools and huge pressing machines. *RITM*, 2014, no. 6, pp. 28–30. (In Russ.).
- [6] *Stanki-kolonna-karusel'nye*. URL: <https://kzts.su> (accessed: 11.05.2021).
- [7] *MTs-2 — Tsentr obrabatyvayushchiy vysokoskorostnoy pyatikoordinatnyy* [MTs-2 – universal high-speed processing center]. *mashinform.ru: website*. URL: <https://mashinform.ru/oborudovanie-stanki/m/mtc-2.shtml> (accessed: 11.05.2021). (In Russ.).
- [8] Apro K. *Secrets of 5-axis machining*. Industrial Press, 2008. 184 p.
- [9] Warkentin A., Bedi S., Ismail F. Five-axis milling of spherical surfaces. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1996, vol. 36, no. 2, pp. 229–243, doi: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)98763-W](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)98763-W)
- [10] Warkentin A., Ismail F., Bedi S. Comparison between multi-point and other 5-axis tool positioning strategies. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2000, vol. 40, no. 2, pp. 185–208, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00058-9)
- [11] Gray P.J., Warkentin A., Ismail F., et al. Graphics-assisted rolling ball-method for 5-axis surface machining. *Comput. Aided Des.*, 2004, vol. 36, no. 7, pp. 653–663, doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(03\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(03)00141-6)
- [12] Delone B.V., Raykov D.A. *Analiticheskaya geometriya*. Т. 2 [Analytic geometry. Vol. 2]. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1949. 516 p. (In Russ.).
- [13] Vechtomov V.A., Golubtsov M.E., Mozharov E.O. Mirror collimator of millimetre range. *Engineering Journal: Science and Innovation. Electronic science and engineering publication*, 2012, no. 8, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-8-340> (in Russ.).
- [14] Borisov A.A., Parshchikov A.A. *Konstruksiya, tekhnologiya izgotovleniya i metodika kontrolya otrazhayushchey poverkhnosti anteny radioteleskopa RT-16 MGTU* [Construc-

- tion, production technology and control method for reflecting antenna surface of radar telescope RT-16 MGTU]. V: *Konstruktsii zerkal'nykh anten*. Ch. 1 [Mirror antennae constructions. Vol. 1]. Riga, Zinatne Publ., 1990, pp. 221–227. (In Russ.).
- [15] Vechtomov V.A. [Millimeter-wave airborne antenna test facility based on mirror collimator]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2015, vol. 1, pp. 87–91. (In Russ.).
- [16] Karpachev A.Yu. Inhere dynamic characteristics of rotative round saws at nonuniform heating. *Vestnik mashinostroeniya*, 2006, no. 5, pp. 32–36. (In Russ.).
- [17] Karpachev A.Yu., Nikolaev S.M. Dynamic research of circular saw with radial compensators. *Vestnik mashinostroeniya*, 2013, no. 12, pp. 37–38. (In Russ.).
- [18] Sayapin S.N., Sinev A.V. *Sposob obrabotki poverkhnosti vtorogo poryadka i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for working second-order surface and apparatus for performing the same]. Patent RU 2170161. Appl. 25.05.1999, publ. 10.07.2001. (In Russ.).
- [19] Sayapin S.N. New method for second-order surface processing. *STIN*, 2002, no. 1, pp. 30–32. (In Russ.).
- [20] Sayapin S.N. *Analiz i sintez raskryvaemykh na orbite pretsizionnykh krupnogabaritnykh mekhanizmov i konstruktsiy kosmicheskikh radioteleskopov lepestkovogo tipa*. Diss. dok. tekhn. nauk [Analysis and synthesis of precision large-size expandable on orbit mechanisms and space leaf-type radar telescopes constructions. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, IMASH RAN Publ., 2003. 446 p. (In Russ.).
- [21] Beklemishev D.V. *Kurs analiticheskoy geometrii i lineynoy algebry* [Course of analytic geometry and linear algebra]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 320 p. (In Russ.).
- [22] Sayapin S.N. Universal quickly assembled parabolic reflector with regulate surface for operating in microwave band. *Vestnik mashinostroeniya*, 2013, no. 11, pp. 6–13. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.06.2021

Информация об авторах

САЯПИН Сергей Николаевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»; профессор кафедры «Теоретическая механика» им. профессора Н.Е. Жуковского. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

БРЫНДИНА Ольга Олеговна — лаборант. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Хари-тоньевский переулок, д. 4, e-mail: hikari10_3@mail.ru).

ВАНИНА Полина Геннадьевна — лаборант. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Хари-тоньевский переулок, д. 4, e-mail: p.vanina@list.ru).

Information about the authors

SAYAPIN Sergey Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Chief Research Fellow. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Department of Theoretical Mechanics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

BRYNDINA Olga Olegovna — Research Assistant. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Khari-tonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: hikari10_3@mail.ru).

VANINA Polina Gennadievna — Research Assistant. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: p.vanina@list.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Саяпин С.Н., Брындина О.О., Ванина П.Г. Новый подход к трехкоординатному фрезерованию крупногабаритных поверхностей второго порядка. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 19–28, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-19-28

Please cite this article in English as:

Sayapin S.N., Bryndina O.O., Vanina P.G. New Approach to Three-Coordinate Milling of Large-Sized Surfaces of Second Order. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 12, pp. 19–28, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-19-28