



Разработка технологии изготовления твердосплавных пуансонов с линейным параболическим профилем

В. В. Лапшин¹, Е. М. Захаревич¹, А. С. Нарикович²,
А. С. Коротков², И. И. Лятун², А. А. Снигирев²

¹ ООО «Научно-производственное объединение Асферика»,
Москва, Россия

² Балтийский федеральный университет им. Иммануила
Канта, Калининград, Россия

В статье описана технология обработки твердосплавных пуансонов с линейным параболическим профилем. Представлена кинематика обработки рассматриваемых поверхностей. Для обеспечения необходимой кинематики на имеющемся в наличии оборудовании разработана дополнительная линейная ось станка. Также разработана методика правки кромки шлифовальных головок на определенный радиус. Представлена методика контроля обработанного профиля. Приведены результаты применения разработанных методик для обработки пуансонов с использованием различных шлифовальных головок.

Ключевые слова: алмазное шлифование, правка, пуансоны, шлифовальные головки, рентгеновские преломляющие линзы

Статья получена: 28.04.2022

Статья принята: 12.05.2022

ВВЕДЕНИЕ

Использование рентгеновской преломляющей оптики для развития методов фокусировки и имиджинга рентгеновского излучения (РИ) с целью исследований микро- и нано-объектов

Processing Technology Development for Hard-Alloy Punches with a Linear Parabolic Profile

V. V. Lapshin¹, E. M. Zakharevich¹, A. S. Narikovich²,
A. S. Korotkov², I. I. Lyatun², A. A. Snigirev²

¹ Scientific and Production Association "Aspherika" LLC, Moscow, Russia

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

The article describes the processing technology for hard-alloy punches with a linear parabolic profile. The processing kinematics for the surfaces considered is presented. In order to provide the required kinematics using the available equipment, an additional linear machine axis has been developed. The dressing method for the grinding head edges to a certain radius has also been developed. The processed profile control method is explained. The results of the developed method application for processing of punches using various grinding heads are presented.

Keywords: diamond grinding, dressing, punches, grinding heads, x-ray refractive lenses

Received on: 28.04.2022

Accepted on: 12.05.2022

INTRODUCTION

The use of refractive X-ray optics for the development of methods of X-ray focusing and imaging in order to study the microscopic and nano-scale objects has been successfully performed for 25 years [1]. Since the first experimental demonstration of their use, the X-ray refractive lenses have been permanently included in the toolkit of up-to-date specialized synchrotron radiation sources due to a number of advantages: they are easily adjusted, relatively insensitive to misorientation and mechanical vibrations, and are also able to withstand high thermal and radiation loads [2-4]. In comparison to the X-ray

успешно ведется уже 25 лет [1]. С момента первой экспериментальной демонстрации их использования рентгеновские преломляющие линзы прочно вошли в инструментарий современных специализированных источников синхротронного излучения благодаря ряду преимуществ: они легко настраиваются, относительно нечувствительны к разориентации и механическим колебаниям, а также способны выдерживать высокие термические и радиационные нагрузки [2-4]. По сравнению с рентгеновскими зеркалами и кристаллическими монохроматорами, линзы не меняют направления распространения первичного пучка рентгеновских лучей, что существенно упрощает оптическую схему синхротронных станций.

Первые преломляющие линзы представляли собой ряд цилиндрических отверстий, выполненных в блоке алюминия, формируя составную преломляющую линзу (СПЛ). Большое количество отверстий позволило компенсировать слабый эффект преломления рентгеновского излучения и, как следствие, получить приемлемое фокусное расстояние в диапазоне энергий от 5 до 40 кэВ. Согласно теории волновой оптики, подобная фокусирующая линза имеет сильные сферические aberrации, вызванные круглым профилем отверстий. Решением проблемы сферических aberrаций является использование параболического профиля линз [5].

Принцип работы рентгеновской линзы аналогичен принципу работы классической оптической линзы и основан на эффекте преломления, но при этом показатель преломления материалов для рентгеновского излучения меньше единицы, что определяет вогнутый профиль фокусирующей оптики. В зависимости от формы профиля одномерных линз, формирующих СПЛ, можно выделить два типа – для одномерной и двумерной фокусировки РИ. Следовательно, форма профиля углубления для одномерной фокусировки имеет линейный параболический профиль, а для двумерной фокусировки форма профиля представляет собой параболоид вращения. Непосредственное влияние на предельное разрешение линзы и качество передаваемого линзой изображения оказывает не только внутренняя структура материала, но и совершенство геометрических характеристик линзы – точность профиля линзы и шероховатость оптической поверхности [6].

Решение задачи получения высококачественного параболического профиля линзы в первую очередь достигается за счет изготовления специальных твердосплавных пресс-форм с малым ради-

mirrors and crystal monochromators, the lenses do not change the direction of the primary X-ray beam propagation that significantly simplifies the optical circuit of synchrotron stations.

The first refractive lenses were a series of cylindrical apertures made in an aluminum block while forming a compound refractive lens (CRL). A large number of apertures made it possible to compensate for the weak X-ray refraction effect and, as a result, to obtain an acceptable focal distance in the energy range from 5 to 40 keV. According to the wave optics theory, such a focusing lens has strong spherical aberrations caused by the circular aperture profile. The solution to the problem of spherical aberrations is the use of a parabolic lens profile [5].

The operating principle of an X-ray lens is similar to that of a classical optical lens. It is based on the refraction effect, but at the same time, the refractive index of X-ray materials is less than one that determines the concave profile of focusing optics. Depending on the profile shape of single lenses forming the CPL, two types can be distinguished – for one-dimensional and two-dimensional X-ray focusing. Therefore, the recess profile shape for one-dimensional focusing has a linear parabolic profile, while the profile shape for two-dimensional focusing is a rotational paraboloid. The ultimate lens resolution and the quality of the image transmitted by the lens are directly affected not only by the internal material structure, but also by the perfection degree of the geometric lens specifications, such as the lens profile accuracy and the optical surface roughness [6].

The solution to the problem of obtaining a high-quality parabolic lens profile is primarily achieved by producing the special hard-alloy molds with a small bending radius (up to 50 μm), a small profile shape error (less than 1 μm), and high surface purity (RMS ~ 10 nm) using the ultra-precision CNC lathes [7]. Moreover, the manufacture of punches with the rotational paraboloid shape does not require any changes in the kinematic machining flow diagrams, while the manufacture of punches with a linear parabolic profile requires changes in the processing procedure for the parts. This paper presents the results of the developed processing technology for punches with a linear parabolic profile.

The workpiece (Fig. 1) is a hard-alloy rod with a diameter of 6 mm, on one end of which there is a protrusion, having a parabolic shape in its section. The linear parabolic protrusion also has recesses on both sides and its length is 4 mm. Moreover, the flattened surface is available along the entire rod.

усом закругления (до 50 мкм), малой ошибкой формы профиля (менее 1 мкм) и высокой чистой поверхности (RMS ~10 нм) с использованием ультрапрецизионных токарных станков с ЧПУ [7]. При этом для изготовления пуансонов с формой параболоида вращения не требуется изменения кинематических схем механической обработки. В то время как для изготовления пуансонов с линейным параболическим профилем необходимо изменение технологического процесса обработки деталей. В данной работе представлены результаты разработанной технологии обработки пуансонов с линейным параболическим профилем.

Обрабатываемая деталь (рис. 1) представляет собой твердосплавный стержень диаметром 6 мм, на одном торце которого выполнен выступ, имеющий в сечении форму параболы. Линейный параболический выступ также имеет обнижения с двух сторон, и его длина составляет 4 мм. Также вдоль всего стержня имеется лыска.

Параболический профиль (рис. 2) описывается следующей формулой:

$$z = ax^2,$$

где a – параметр, который отвечает за кривизну параболы и определяется потребителем изделия. Основание параболы должно иметь радиус скругления не более 0,1 мм.

К детали предъявляются следующие требования по точности и качеству:

- шероховатость поверхности параболического профиля должна составлять Ra не более 0,01 мкм;
- точность формы параболического профиля составляет 1 мкм;
- торец на котором выполнен выступ должен иметь отклонение от плоскостности 1 мкм и шероховатость не более Ra не более 0,01 мкм;
- параболический профиль должен быть параллелен плоскости лыски с точностью 1 мкм.

ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ

Обработка твердосплавных пуансонов с параболическим профилем типа тела вращения была рассмотрена в статьях [8, 9]. Но для изготовления пуансона с линейным параболическим профилем кинематика обработки, описанная в статьях, не подходит. Вместо двух линейных и двух круговых осей необходимо использовать три линейные и одну круговую ось. Для этого необходимо

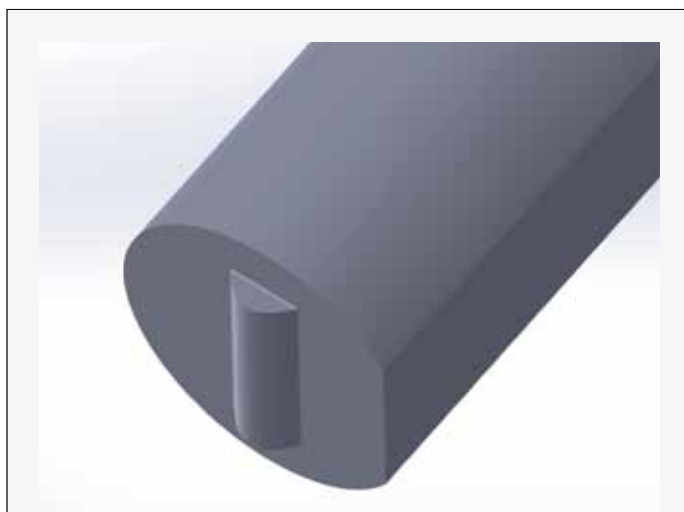


Рис. 1. 3D-модель пуансона

Fig. 1. 3D punch model

The parabolic profile (Fig. 2) is described by the following formula:

$$z = ax^2,$$

where a is a parameter used for the parabola curvature and is determined by the product consumer. The parabola base shall have a rounding radius of no more than 0.1 mm.

The following requirements for accuracy and quality are imposed on the part:

- the parabolic profile surface roughness Ra shall be not more than 0.01 μm ;
- the parabolic profile shape accuracy is 1 μm ;
- the end on which the protrusion is made shall have a flatness deviation of 1 μm and a roughness Ra of not more than 0.01 μm ;

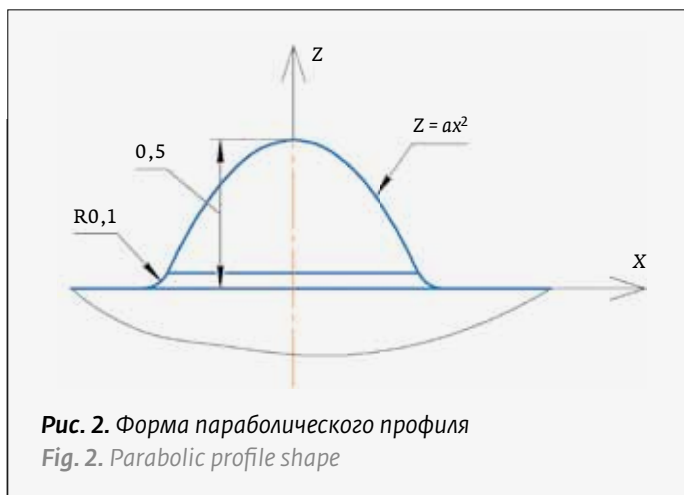
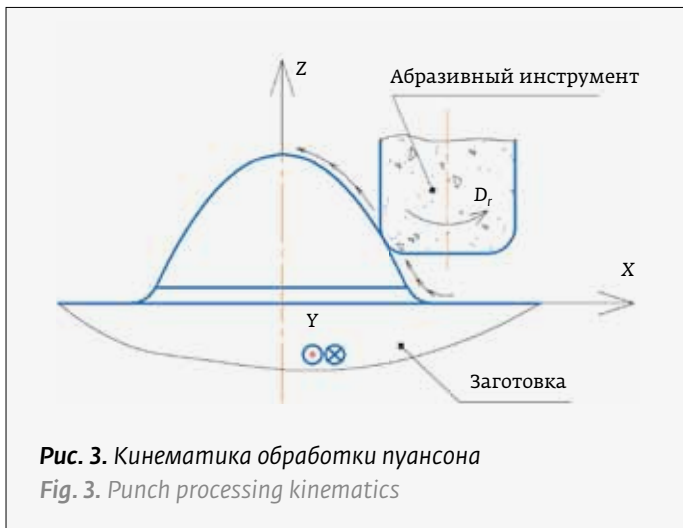


Рис. 2. Форма параболического профиля

Fig. 2. Parabolic profile shape



выполнять обработку на 3-х координатном станке. По координатам X и Z производится формирование профиля параболы, а по оси Y инструмент или деталь должны совершать колебательные движения, при этом на один двойной ход по оси Y приходится смещение на 1 шаг по контуру (рис. 3).

Так как к обрабатываемым поверхностям пуансона предъявляются высокие требования по точности и качеству поверхности, то необходимо использовать ультрапрецизионное оборудование. В станочном парке ООО «НПО Асферика» имеется ультрапрецизионный станок с ЧПУ «Асферика-ФЗ», который обладает следующими конструктивными особенностями:

- аэростатические направляющие на линейных осях X и Z ;
- станина станка установлена на виброизолирующих опорах;
- использование прямых линейных приводов;
- минимально программируемое перемещение 10 нм.

Так как станок имеет всего две линейные оси перемещения (X , Z), то в стандартной комплектации станка пуансоны с линейным параболическим профилем обработать невозможно. Для того, чтобы выполнить обработку, была разработана дополнительная ось Y (рис. 4), которая бы обеспечивала колебательные перемещения заготовки в вертикальном направлении. Так как к заготовкам предъявляются высокие требования к качеству обработки, то дополнительная ось Y также оснащена аэростатическими направляющими.

Ось Y состоит из следующих основных элементов: основание, аэростатические направляющие, шип, пневматический цилиндр. Шип перемещается на аэростатических направляющих вверх-

- the parabolic profile shall be parallel to the flattened surface plane with an accuracy of $1 \mu\text{m}$.

FEATURES OF THE PRODUCT PROCESSING KINEMATICS

Processing of the hard-alloy punches with a parabolic rotation body profile was considered in the articles [8, 9]. In order to manufacture the punch with a linear parabolic profile, the processing kinematics described in the articles are not suitable. Instead of two linear and two circular axes, three linear and one circular axes shall be used. For this purpose, it is necessary to perform processing using a three-axis-controlled machine. The parabola profile is formed based on the X and Z coordinates, and the tool or part shall oscillate along the Y axis, while there is a one-step displacement along the contour per one double move along the Y axis (Fig. 3).

Since the high requirements are set for the machined punch surfaces in terms of accuracy and surface qual-



вниз при помощи пневматического цилиндра, при этом суммарный ход составляет 25 мм. Плавность перемещения заготовки по оси Y достигается за счет использования пневматического цилиндра в прецизионном исполнении.

Таким образом за счет дополнительной оси Y на станке «Асферика-Ф3» можно обеспечить обработку пуансонов с линейным параболическим профилем. Сама заготовка закрепляется в оправке, закрепленной на шипе оси Y, и совершает колебательные движения. Шлифовальный шпиндель с абразивным инструментом устанавливается на каретке оси Z станка, а ось Y – на оси X станка.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРАВКИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Для обработки твердосплавных пуансонов используются алмазные шлифовальные головки с различной зернистостью и связками.

Для того, чтобы выполнить обработку параболической поверхности с точностью формы до 1 мкм, необходимо знать радиус шлифовальной головки R (рис. 5). При этом радиус должен быть 0,1 мм или меньше (для обеспечения радиуса у основания параболы) и не варьироваться, а иметь одинаковое значение вдоль всего периметра.

Обычно шлифовальные головки не имеют какого-либо конкретного радиуса на кромке

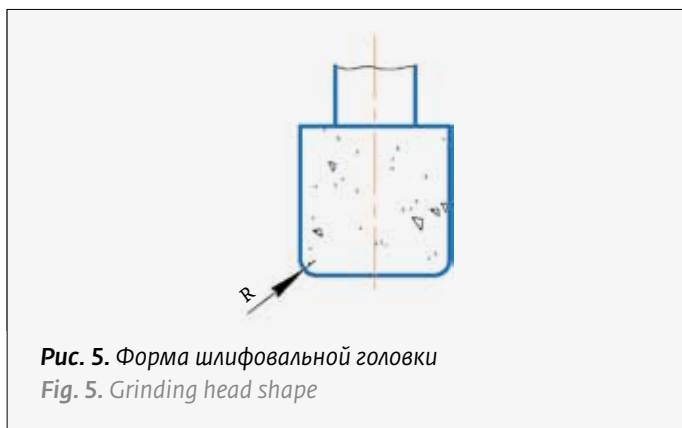


Рис. 5. Форма шлифовальной головки
Fig. 5. Grinding head shape

ity, it is necessary to use the ultra-precise equipment. Scientific and Production Association “Aspherika” LLC has an Aspherika-F3 ultra-precision CNC machine in its fleet that has the following design features:

- aerostatic guides on the X and Z linear axes;
- the machine frame is installed on the antivibration mounts;
- use of the direct linear drive units;
- minimum programmable displacement is 10 nm.

Since the machine has only two linear axes of movement (X, Z), then the punches with a linear parabolic profile cannot be machined using the basic machine configuration. In order to perform the processing, an additional Y-axis was developed (Fig. 4) that would

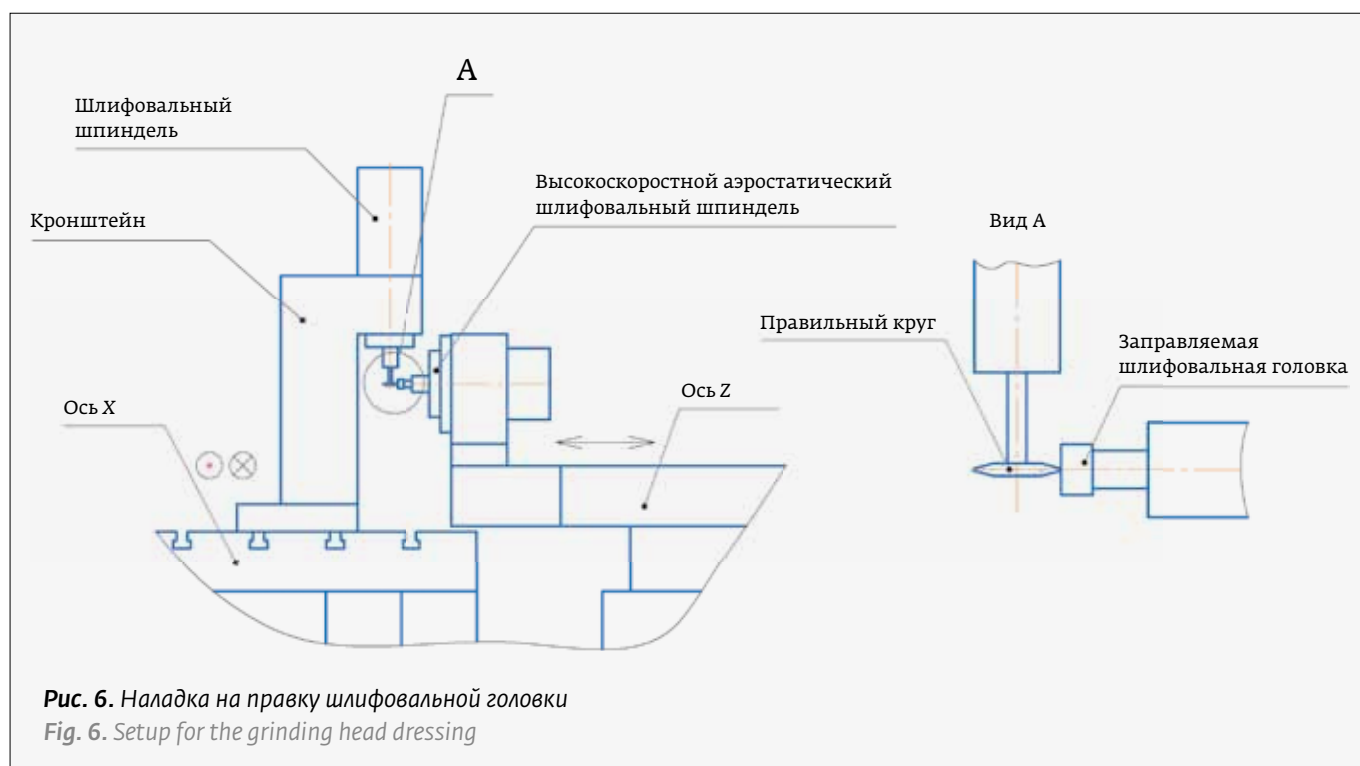


Рис. 6. Настройка на правку шлифовальной головки
Fig. 6. Setup for the grinding head dressing

и имеют переменное значение вдоль периметра. Для обеспечения необходимого радиуса шлифовальной головки необходимо выполнить операцию правки. Как правило, для шлифовальных головок выполняется правка по наружной цилиндрической поверхности при помощи правильных карандашей или роликов. Однако для обработки деталей, рассматриваемых в статье, необходимо выполнить профильную правку шлифовальных головок по радиусу.

Для выполнения такой правки разработан специальная наладка, реализованная на станке «Асферика-ФЗ». Схема правки показана на рис. 6 и 7. Заправляемая шлифовальная головка закреплялась на высокоскоростном аэростатическом шлифовальном шпинделе, который устанавливался на оси Z станка. Правильный круг закрепляли в шлифовальном шпинделе, установленном на кронштейне оси X. При этом ось вращения правильного круга располагалась перпендикулярно оси вращения заправляемой головки. При правке правильный круг проходит вдоль образующей заправляемой головки по заданной траектории, формируя необходимый радиус R (рис. 7).

В качестве правильного круга использован шлифовальный круг с многослойным композиционным электролитическим покрытием на основе никеля. Зернистость алмаза правильного круга составляла 125–160 мкм.

По разработанной технологии выполнена правка шлифовальных головок (рис. 8), примененных для черновой и чистовой обработки пуансонов с линейным параболическим профилем.

Черновая обработка пуансонов выполнена при помощи шлифовальной головки с зернистостью алмаза 100–125 мкм на металлической связке фирмы Naefeli (Швейцария). Перед проведением операции правки на радиус шлифовальную головку рассматривали с помощью микроскопа с целью определения текущего состояния кромки, а также с целью определения необходимого съема материала при правке. На рис. 9а показано первоначальное состояние кромки шлифовальной головки. Видно, что кромка головки изношена, так как ранее была использована на других шлифовальных операциях, и не имеет четко выраженного радиуса, требуемого для обработки пуансонов.

Правка черновой головки выполнена за несколько проходов, причем суммарный съем составил 0,08 мм на диаметр. Режимы правки: частота вращения правильного круга 20 000 об/мин, частота вращения заправляемой шлифовальной головки 10 000 об/мин, ско-

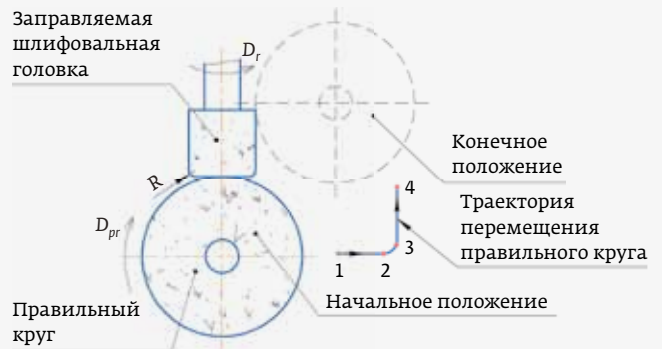


Рис. 7. Схема правки шлифовальной головки (вид сверху)
Fig. 7. Dressing diagram for the grinding head (top view)

oscillate the workpiece in the vertical direction. Since the workpieces are subject to the high requirements for the processing quality, the additional Y-axis is also equipped with the aerostatic guides.

The Y-axis consists of the following basic elements: a base, aerostatic guides, a slide, and a pneumatic cylinder. The slide moves up and down on the aerostatic guides with the help of a pneumatic cylinder, while the combined stroke is 25 mm. The smooth workpiece movement along the Y axis is achieved due to the use of a precision pneumatic cylinder.

Thus, due to the additional Y-axis, the Aspherika-F3 machine can ensure the processing of punches with



Рис. 8. Абразивный инструмент (слева направо: правильный круг, черновая шлифовальная головка, чистовая шлифовальная головка).

Fig. 8. Abrasive tool (from left to right: dressing wheel, roughing grinding head, finishing grinding head).

рость обработки по контуру 10 мм/мин. За каждый проход с заправляемой головки выполнялся сьем 0,01 мм на диаметр.

После правки с помощью микроскопа проводили контроль полученного радиуса шлифовальной головки. На рис. 9b показан пример замера заправленной шлифовальной головки. Как видно из рисунка, дефекты, которые изначально присутствовали на головке, были устранены, и полученный радиус скругления составляет $R=0,1$ мм.

По аналогичной технологии выполнена правка чистой шлифовальной головки. Шлифовальная головка с зернистостью алмаза 7-10 мкм на полиуретановой связке была изготовлена по специальному заказу в ООО НПК «Электрокристалл» (Россия). На рис. 10а, б показаны замеры чистой шлифовальной головки до и после правки. Правка выполнена на тех же режимах, что и для черновой шлифовальной головки. Полученный радиус составил также $R=0,1$ мм.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ПУАНСОНОВ

Для обработки пуансонов с линейным параболическим профилем для станка «Асферика Ф-3» была спроектирована специальная наладка. Схема обработки показана на рис. 11. Шлифовальная головка устанавливалась в высокоскоростной аэро-статический шпиндель, закрепленный на кронштейне каретки Z. Обрабатываемая заготовка закреплялась на оправке, установленной на шипе оси Y. При обработке заготовка совершала колебательные движения в вертикальной плоскости, при этом на каждый двойной ход происходило смещение шлифовальной головки относительно заготовки по заданной траектории. Необходимая траектория обеспечивалась за счет одновременного перемещения кареток по осям X и Z. Управляющая программа обеспечивает равномерный шаг по профилю параболы. Вместе с дополнительной вертикальной осью Y на каретке оси X также располагалась наладка на правку шлифовальных головок.

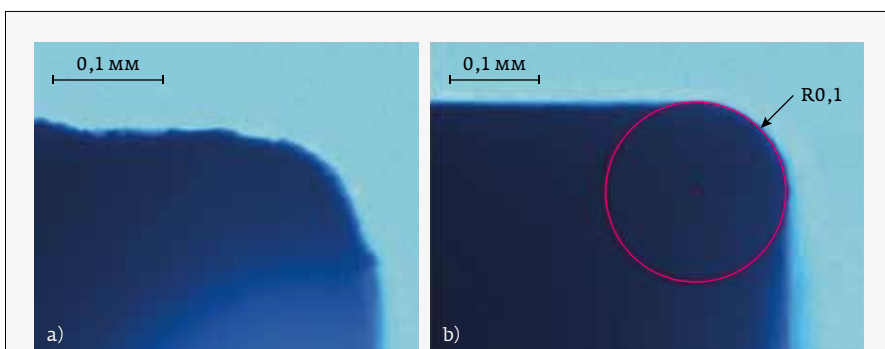


Рис. 9. Черновая шлифовальная головка до (а) и после правки (б)
Fig. 9. Roughing grinding head before (a) and after dressing (b)

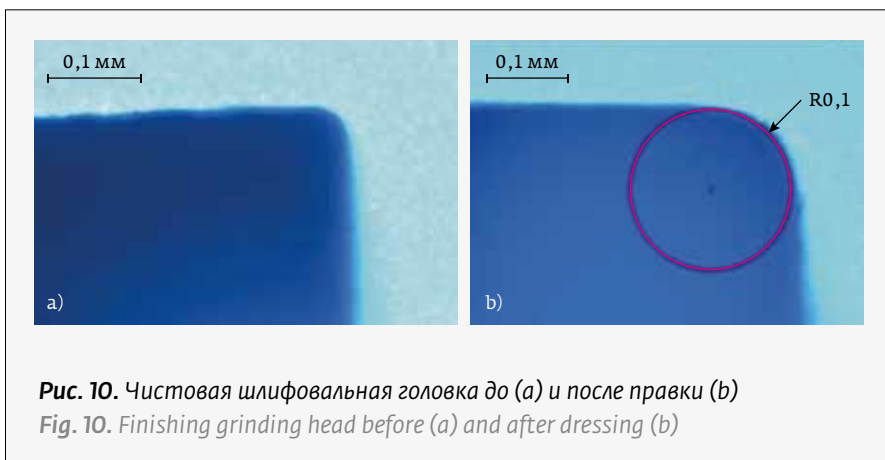


Рис. 10. Чистовая шлифовальная головка до (а) и после правки (б)
Fig. 10. Finishing grinding head before (a) and after dressing (b)

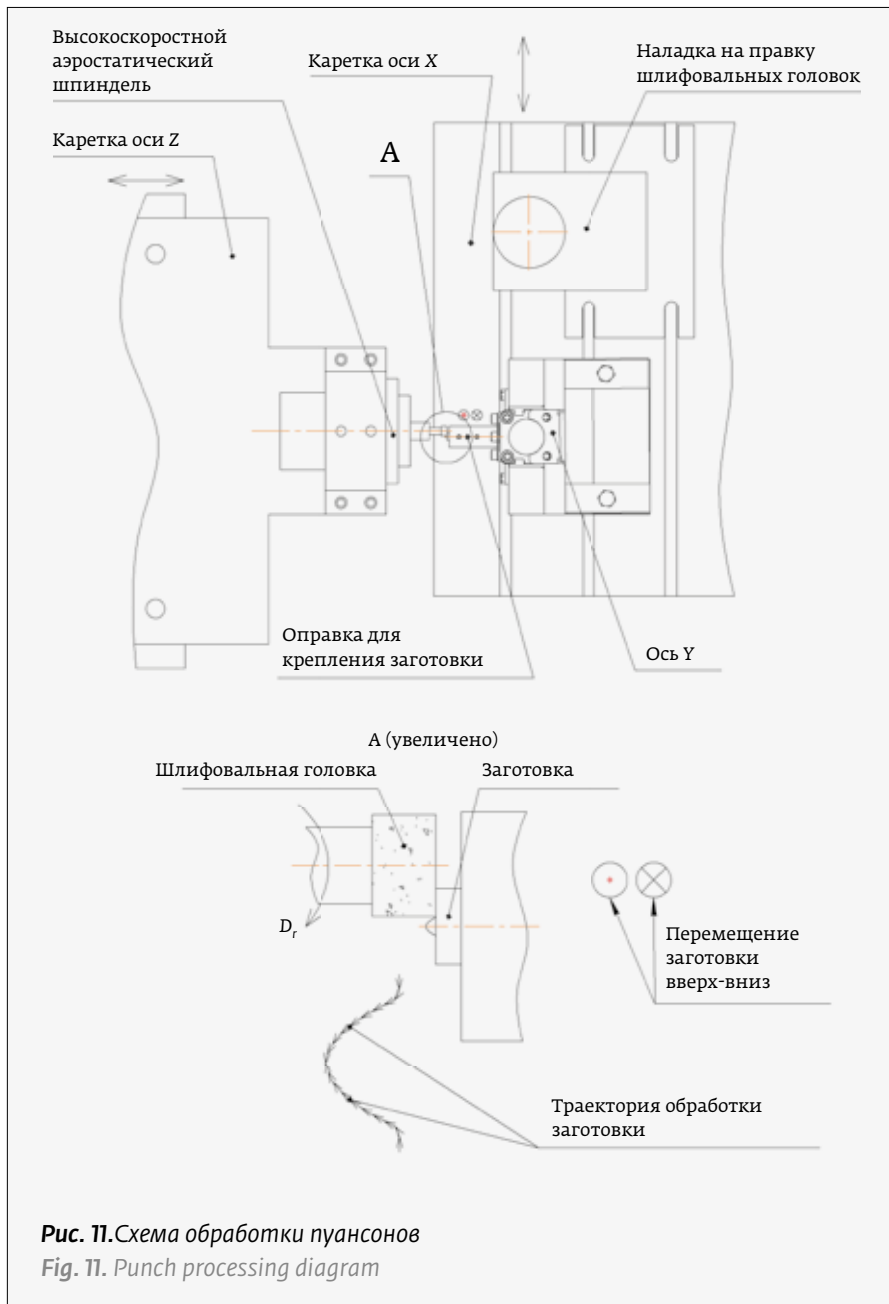
a linear parabolic profile. The workpiece is fixed in a mandrel installed on the Y-axis slide and executes oscillations. The grinding spindle with an abrasive tool is mounted on the machine Z axis slide, and the Y axis is installed on the X axis of the machine.

DRESSING TECHNOLOGY FOR AN ABRASIVE TOOL

The diamond grinding heads with various grain sizes and bonds are used for processing the hard-alloy punches.

In order to process a parabolic surface with a shape accuracy of up to $1 \mu\text{m}$, it is necessary to know the grinding head radius R (Fig. 5), while the radius shall be 0.1 mm or less (to ensure the radius at the parabola base) and have the same value along the entire perimeter.

Typically, the grinding heads do not have any particular radius at the edge, and are variable along the perimeter. To ensure the required radius of the grinding head, it is necessary to perform a dressing operation. As a rule, dressing of the grinding heads is performed on the outer cylindrical surface using



Профиль параболы формировался обработкой с двух сторон отдельно, при этом для того, чтобы обеспечить отсутствие нестыковок на вершине параболы, осуществлялась точная привязка шлифовальной головки с двух сторон заготовки.

Разработанная технология обработки заготовок состоит из следующих этапов:

1. Черновая обработка заготовки с целью выполнения обнижения с двух сторон от параболы;
2. Метрологический контроль заготовки и черновой шлифовальной головки;
3. Правка черновой шлифовальной головки для выполнения обработки по контуру;

the straightening sticks or rollers. However, for processing the parts considered in the article, it is necessary to perform the profile dressing of the grinding heads along the radius.

In order to perform such dressing, a special setup has been developed, implemented for the Aspherika-F3 machine. The dressing diagram is shown in Figures 6, 7. The dressed grinding head was mounted on a high-speed aerostatic grinding spindle that was mounted on the Z-axis of the machine. The dressing wheel was fixed in the grinding spindle mounted on the X-axis bracket, while the rotation axis of the dressing wheel was perpendicular to the rotation axis of the dressing head. In the dressing process, the dressing wheel passes along the dressed head generatrix along a given trajectory, forming the required radius R (Fig. 7).

The grinding wheel with a multilayer composite electrolytic nickel-based coating was used as a dressing wheel. The grain size of a dressing wheel diamond was 125-160 μm .

According to the developed technology, the grinding heads were dressed (Fig. 8). Such heads were used for roughing and finishing the punches with a linear parabolic profile.

The punch roughing was performed using a grinding head with

a grain size of 100-125 μm on a metal bond by Haefeli (Switzerland). Prior to the radius dressing operation, the grinding head was examined under a microscope in order to determine the current edge condition, as well as to determine the required material removal during dressing. Figure 9a shows the initial condition of the grinding head edge. As can be seen from the figure, the edge of the head is worn, since it has been previously used for other grinding operations and does not have a well-pronounced radius required for the punch processing.

The roughing head is dressed in several passes, and the total removal was 0.08 mm per diameter. The

4. Метрологический контроль заправленной шлифовальной головки;
5. Обработка требуемого профиля заготовки при помощи черновой шлифовальной головки;
6. Метрологический контроль обработанной заготовки и коррекция управляющей программы в системе ЧПУ;
7. Повторение пунктов 5 и 6 до достижения минимального отклонения обработанного профиля от теоретического. При необходимости требуется повторно выполнять правку шлифовальной головки;
8. Правка чистой шлифовальной головки;
9. Обработка требуемого профиля заготовки при помощи чистой шлифовальной головки;
10. Метрологический контроль обработанной заготовки;
11. Повторение пунктов 9 и 10 до достижения требуемой шероховатости обрабатываемого профиля;
12. Разворот заготовки на 90° и обработка обнижений линейного параболического профиля с двух сторон.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ПУАНСОНОВ

По разработанной технологии был обработан ряд пуансонов с различным параболическим профилем. Формула, описывающая параболическую поверхность, была задана заказчиком изделий.

Обработка (рис. 12) выполнена на следующих режимах:

- частота вращения шлифовальной головки 20000 об/мин;
- величина смещения по профилю параболы на двойной шаг: 5 мкм при черновой обработке, 2 мкм при чистой обработке.
- длительность двойного хода 1,7 секунды.

Последовательность формирования профиля параболической поверхности показана на рис. 13. Контроль обрабатываемых изделий выполнялся на видеоизмерительном микроскопе. 2D-профиль требуемой формы поверхности при помощи специального ПО микроскопа накладывался на получаемое изображение, и таким образом производилась оценка оставшегося припуска. На рис. 13 показана последовательность получения параболы типа 1 и 2. Обработанная деталь до и после обработки обнижений показана на рис. 14.

Выходной контроль пуансонов был выполнен на уникальной научной установке «Научно-образовательный многофункциональный комплекс подготовки и проведения синхротронных

dressing modes are as follows: the dressing wheel rotational speed is 20,000 rpm, the dressed grinding head rotational speed is 10,000 rpm, the contour processing speed is 10 mm/min. 0.01 mm per diameter was removed from the dressed head in one pass.

After dressing, the grinding head was also examined under a microscope in order to determine the resulting radius. Figure 9b shows an example of measuring the dressed grinding head. As can be seen from the figure, the defects initially available on the head were eliminated and the resulting rounding radius was $R=0.1$ mm.

The finishing grinding head was dressed using a similar process. The grinding head with a grain size of 7–10 microns on a polyurethane bond was made by special order by Research and Production Complex “Electrocrystal” LLC (Russia). Figure 10 a, b shows the measurements of a finishing grinding head before and after dressing. Dressing was performed using the same modes as for the roughing grinding head. The resulting radius was also $R=0.1$ mm.

PUNCH PROCESSING TECHNOLOGY

A special setup was designed for the Aspherika F-3 machine in order to process the punches with a linear parabolic profile. The processing outline is shown in Fig. 11. The grinding head was installed in a high-speed aerostatic spindle mounted on the Z slide bracket. The workpiece to be machined was fixed on the mandrel mounted on the Y axis slide. During processing, the workpiece made oscillatory movements in the vertical plane, and the grinding head was displaced relative to the workpiece along a given trajectory during each double stroke. The required trajectory was provided by the simultaneous movement of the slides along the X and Z axes. The control program was prepared in such



Рис. 12. Обработка заготовки на станке «Асферика-Ф3».
Fig. 12. Workpiece processing using the Aspherika-F3 machine

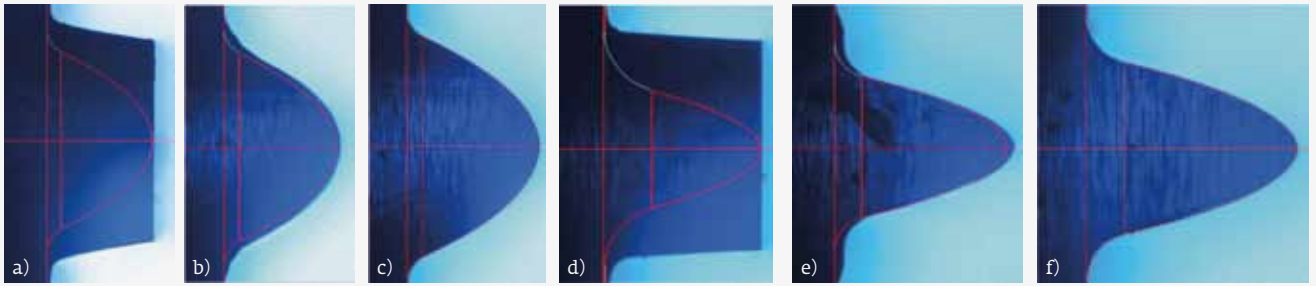


Рис. 13. Последовательность получения профиля пуансона: тип параболы 1 (a, b, c), тип параболы 2 (d, e, f).
Fig. 13. Work sequence for obtaining the punch profile: type 1 parabola (a, b, c), type 2 parabola (d, e, f).

исследований» (УНУ «SynchrotronLike») с применением метода высокоразрешающей радиографии на основе микрофокусного лабораторного источника рентгеновского излучения MetalJet (с характеристической линией 9,251 кэВ (Ga K α) и системой моторизованных подвижек [10]). Для регистрации изображений с высоким пространственным разрешением использовалась камера Rigaku с размером пиксела 0,55 мкм. Расстояние между источником излучения и образцом (комплект пуансонов) составляло 38,3 см, а расстояние между образцом и камерой – 1,2 см. Основными критериями выбора метода измерения характерных параметров были выбраны воспроизводимость и достоверность результатов измерений, а также простота реализации и универсальность метода. На рис. 15 представлено радиографическое изображение комплекта пуансонов с номинальным радиусом

a way as to ensure the even pitches along the parabola profile. The setup for the grinding head dressing was also located on the X axis slide together with an additional vertical Y axis.

The parabola profile was formed by separate processing on both sides, while the grinding head was accurately attached on both sides of the workpiece in order to ensure the absence of mismatches at the top of the parabola.

The developed technology for workpiece processing consists of the following stages:

1. Roughing of the workpiece in order to make recesses on both sides of the parabola;
2. Metrological control of the workpiece and roughing grinding head;
3. Dressing of the roughing grinding head for processing along the contours;
4. Metrological control of the dressed grinding head;
5. Processing of the desired workpiece profile with a roughing grinding head;
6. Metrological control of the processed workpiece and adjustment of the control program in the CNC system;
7. Repetition of stages 5 and 6 until the minimum deviation of the processed profile from the theoretical one is achieved. If necessary, the grinding head shall be redressed;
8. Dressing of the finishing grinding head;
9. Processing of the desired workpiece profile with a finishing grinding head;
10. Metrological control of the processed workpiece;



Рис. 14. Обработанный пуансон на станке (a) и готовый пуансон после изготовления обнижений (b)

Fig. 14. Processed punch on the machine (a) and the finished punch after making the recesses (b)

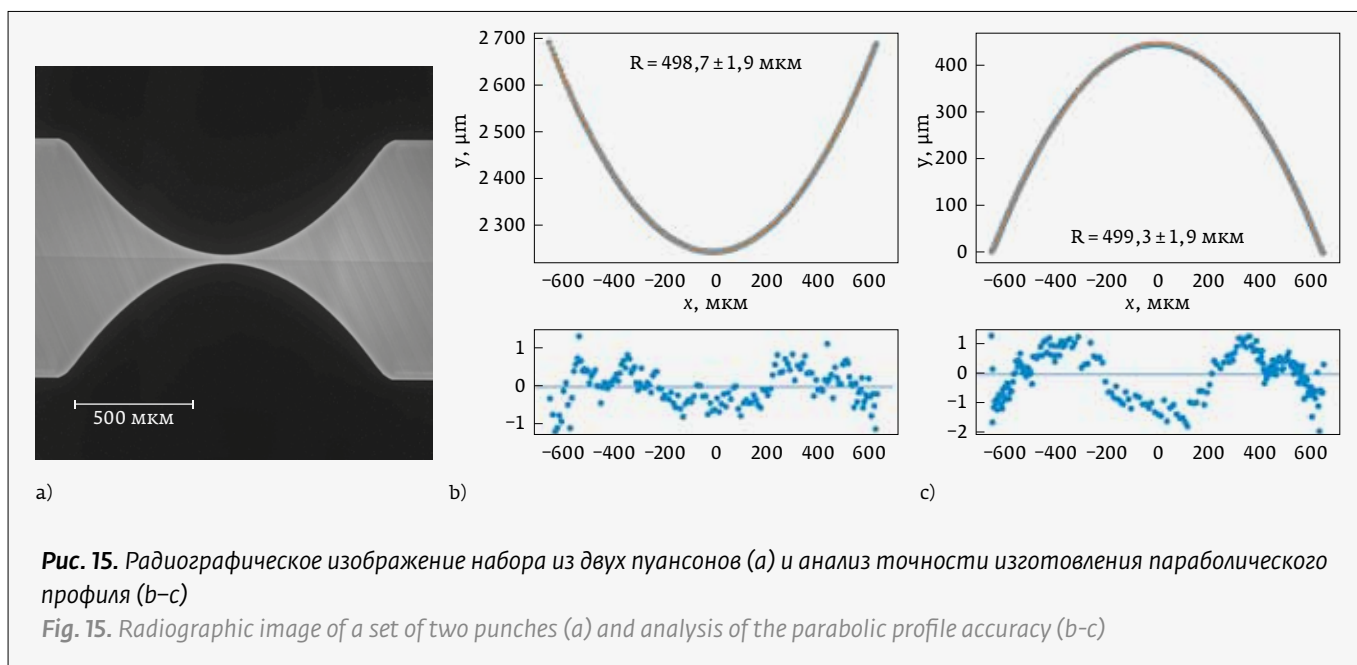


Рис. 15. Радиографическое изображение набора из двух пуансонов (а) и анализ точности изготовления параболического профиля (b–c)

Fig. 15. Radiographic image of a set of two punches (a) and analysis of the parabolic profile accuracy (b–c)

500 мкм (рис. 15а). Анализ полученных изображений и измерение точности параболического профиля пуансонов (рис. 15b, c) был выполнен с помощью метрологического подхода, применяемого для диагностики рентгеновских СПЛ [11].

По результатам исследования качества пуансонов и их соответствия проектным требованиям было экспериментально показано, что предложенная технология обработки пуансонов с линейным параболическим профилем обеспечивает необходимую точность параболической поверхности инструмента для изготавливаемых преломляющих линз, полностью удовлетворяющих требованиям современных источников синхротронного излучения.

ВЫВОДЫ

Разработана и реализована на практике технология обработки пуансонов с линейным параболическим профилем. Для обеспечения кинематики обработки на имеющемся в наличии оборудовании разработана дополнительная вертикальная ось Y с аэростатическими направляющими. Также представлена технология правки шлифовальных головок с определенным радиусом кромки.

По разработанной технологии обработан ряд пуансонов с линейным параболическим профилем. Исследование качества и точности обработанных поверхностей показали, что достигнута необходимая точность и шероховатость поверхности. Также подтверждена возможность выполнения заправки шлифовальных головок на требуемый радиус. Исследование точности заправленных

11. Repetition of stages 9 and 10 until the required roughness of the processed profile is obtained;
12. Turning the workpiece by 90° and processing of the recesses of the linear parabolic profile from both sides.

PUNCH PROCESSING RESULTS

A number of punches with various parabolic profiles were processed according to the developed technology. The formula describing the parabolic surface was set by the product customer.

Processing (Fig. 12) was performed in the following modes:

- rotational speed of the grinding head was 20000 rpm;
- the displacement value along the parabola profile per double step: 5 μm for roughing, 2 μm for finishing;
- the duration of double stroke was 1.7 seconds.

The profiling sequence of the parabolic surface is shown in Fig. 13. The workpieces were controlled using a video-measuring microscope. A 2D profile of the required surface shape was superimposed on the resulting image using the special microscope software, and the remaining allowance was assessed. Figure 13 shows the sequence of obtaining a type 1 and type 2 parabola. The machined part before and after processing of the recesses is shown in Fig. 14.

The final inspection of the punches was performed using a unique scientific installation “Scientific and educational multifunctional complex for the synchrotron research preparation and performance” (USI “SynchrotronLike”), using the high-resolution radiog-



шлифовальных головок и точность профиля обработанных пуансонов выполнено при помощи видеоизмерительного микроскопа.

Перспективой развития разработанной технологии обработки пуансонов является создание ультрапрецизионного станка, позволяющего повысить автоматизацию и производительность. Такой станок должен иметь следующие особенности:

- три линейные управляемые оси на аэростатических опорах (X, Y, Z);
- одна круговая ось С, также выполненная на аэростатических опорах для точного поворота пуансона;
- наличие высокоскоростного аэростатического шлифовального шпинделя (ось S);
- наличие шпинделя для правки шлифовальных головок (ось S₁);
- наличие встроенного микроскопа для контроля заготовок и шлифовальных головок на станке.

Разработкой и изготовлением станков такого типа по техническому заданию заказчика занимается ООО «НПО Асфера».

БЛАГОДАРНОСТЬ

В работе использовано оборудование уникальной научной установки «Научно-образовательный многофункциональный комплекс подготовки и проведения синхротронных исследований» (УНУ «SynchrotronLike»). Экспериментальное исследование высокоточного инструмента было поддержано из средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта. Приобретение необходимых расходных материалов было выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по гранту № 075-15-2021-1362.

REFERENCES

1. **Snigirev A. et al.** A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays. *Nature*. 1998. 384(6604): 49–49. DOI: 10.1038/384049a0.
2. **Roth T. et al.** Materials for x-ray refractive lenses minimizing wavefront distortions: 6. *MRS Bull.* 2017. Vol. 42, № 6. P. 430–436. DOI: 10.1557/mrs.2017.117.
3. **Snigireva I., Polikarpov M., Snigirev A.** Diamond X-Ray Refractive Optics. *Synchrotron Radiation News*. 2021; 1–9.; DOI: 10.1080/08940886.2021.2022387..
4. **Narikovich A. et al.** CRL-based ultra-compact translocator for X-ray focusing and microscopy: 4. *J. Synchrotron Radiat.* 2019; 26(4). DOI:10.1107/S1600577519005708.
5. **Lengeler B. et al.** Parabolic refractive X-ray lenses: 3. *J. Synchrotron Radiat.* 2002; 9(3): 119–124. DOI:10.1107/S0108767305099125.
6. **Lyatun I. I., Goikhman A. Y., Ershov P. A., Snigireva I. I., Snigirev A. A.** On the Problem of the Metrology of Refractive X-ray Optics. *J. Surf. Investig. X-Ray Synchrotron Neutron Tech.* 2015; 9(3): 446–450. DOI: 10.1134/S1027451015030076.
7. **Tummler J.** Development of Compound Refractive Lenses for Hard X Rays. *A Novel Instrument in Hard X-ray Analysis*. – Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH). 2000.
8. **Shavva M. A., Grubiy S. V.** Diamond Grinding of Hard-Alloy Punches Using

raphy method based on the MetalJet microfocus laboratory X-ray source with a characteristic line of 9.251 keV (Ga K α) and a motorized adjustment system [10]. A Rigaku camera with a pixel size of 0.55 μm was used to record images with the high spatial resolution. The distance between the radiation source and the sample (set of punches) was 38.3 cm, and the distance between the sample and the camera was 1.2 cm. The main selection criteria for the measurement method of typical parameters were reproducibility and reliability of the measurement results, as well as the ease of method implementation and universality. Figure 15 shows a radiographic image of a set of punches with a nominal radius of 500 μm (Figure 15a). The analysis of the images obtained and measurement of accuracy of the punch parabolic profile (Figures 15b-15c) were performed using the metrological approach applied for X-ray CPL diagnostics [11].

According to the results of the punch quality study and their compliance with the design requirements, it is experimentally shown that the proposed technology for processing the punches with a linear parabolic profile provides the required accuracy of the tool parabolic surface for the produced refractive lenses that completely meet the requirements of up-to-date synchrotron radiation sources.

CONCLUSION

The processing technology for punches with a linear parabolic profile has been developed and implemented. To ensure the processing kinematics using the available equipment, an additional vertical Y-axis with the aerostatic guides has been developed. The dressing technology for the grinding heads with a certain edge radius is also presented.

A number of punches with a linear parabolic profile were processed according to the developed technology. A study of the machined surface quality and accuracy showed that the required accuracy and surface roughness had been achieved. Possible dressing of the grinding heads to the required radius has also been confirmed. The study of the dressed grinding head accuracy and the machined punch profile accuracy was carried out using a video-measuring microscope.

The development prospects of the provided punch processing technology provide for an ultra-precision machine that allows increasing automation and efficiency. Such a machine shall have the following features:

- three linear controlled axes on the aerostatic bearings (X, Y, Z);
- one circular axis C on the aerostatic bearings for precise punch turning;



Wheels With a Multilayer Composite Electrolytic Coating. *Russian Engineering Research*. 2020;40(10): 826–832. DOI: 10.3103/S1068798X2010024X.

Шавва М. А., Грубый С. В. Алмазное шлифование твердосплавных пуансонов шлифовальными кругами с многослойным композиционным электролитическим покрытием. *Вестник машиностроения*. 2020;7:41–47. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-7-41-47.

9. **Shavva M. A., Grubiy S. V.** Sherokhovatost' poverkhnosti tverdosplavnikov puansonov pri shlifovanii almaznymi krugami, izgotovlennimi po tehnologii mnogosloinogo kompozitsionnogo electroliticheskogo pokrytiya. *Izvestiya vysshikh ychebnikh zavedeniy. Mashinostroeniye*. 2018; 9 (702):10–17. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-9-10-17.
10. **Barannikov A., Shevrytalov S., Zverev D., Narikovich A., Sinitsyn A., Panormov I., Snigireva I., Snigirev A.** Laboratory complex for the tests of the X-ray optics and coherence-related techniques. *Proc. SPIE 11776. EUV and X-ray Optics, Sources, and Instrumentation*, 117760D (18 April 2021). DOI: 10.1117/12.2582687.
11. **Narikovich A., Zverev D., Barannikov A., Lyatun I., Panormov I., Sinitsyn A., Snigireva I., Snigirev A.** Metrological approach for diagnostics of x-ray refractive lenses. *AIP Conference Proceedings*. 2020; 2299:060006. DOI: 10.1063/5.0031371.

АВТОРЫ

Лапшин Василий Владимирович, старший инженер-исследователь, ООО «Научно-производственное объединение Асферика», lapshin_v@aspherica.ru, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-6971-8534

Захаревич Евгений Мефодьевич, главный технолог, ООО «Научно-производственное объединение Асферика», zaharev@gmail.com, Москва, Россия
ORCID: 0000-0001-6997-3335

Нарикович Антон Сергеевич, инженер-исследователь, Балтийский Федеральный Университет им. Иммануила Канта, anarikovich@kantiana.ru, г. Калининград, Россия.
ORCID: 0000-0003-2570-1818

Коротков Александр Сергеевич, лаборант, Балтийский Федеральный Университет им. и Иммануила Канта, askorotkov9@gmail.com, г. Калининград, Россия.
ORCID: 0000-0001-9425-8368

Лятун Иван Игоревич, научный сотрудник, Балтийский Федеральный Университет им. Иммануила Канта, Ilyatun@kantiana.ru, г. Калининград, Россия.
ORCID: 0000-0002-4988-8077

Снигирев Анатолий Александрович, к. ф.- м. н., профессор, директор МНИЦ «Когерентная рентгеновская оптика для установок «Мегасайенс», Балтийский Федеральный Университет им. Иммануила Канта, ASnigirev@kantiana.ru, г. Калининград, Россия.
ORCID: 0000-0002-8892-1925

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Лапшин В. В., Захаревич Е. М.: разработка технологии изготовления пуансонов, технология заправки шлифовальных головок; Нарикович А. С.: анализ литературы, описание результатов, формирование выводов исследования; Коротков А. С.: сбор экспериментальных данных, табличное и графическое представление результатов; Лятун И. И.: постановка методики исследования, проведение исследований и формирование выводов исследования; Снигирев А. А.: внес существенный вклад в концепцию и дизайн исследований, осуществил критический пересмотр статьи на предмет важного интеллектуального содержания, одобрил окончательную версию статьи перед ее подачей для публикации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы утверждают, что у них нет конфликта интересов. Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива. Все авторы принимали участие в написании рукописи в части своего вклада в работу.

- availability of a high-speed aerostatic grinding spindle (S axis);
- availability of a spindle for the grinding head dressing (S₁ axis);
- availability of a built-in microscope to control the workpieces and grinding heads on the machine.

Scientific and Production Association “Aspherika” LLC provides the development and manufacture of such machines according to the customer’s terms of reference.

ACKNOWLEDGEMENT

The scientific equipment of the unique scientific installation “Scientific and educational multifunctional complex for the synchrotron research preparation and performance” (USI “SynchrotronLike”) was used for this paper. The experimental study of the high-precision tool was funded by the strategic academic leadership program “Priority 2030” at the Immanuel Kant Baltic Federal University. The required consumables were purchased with the support of the Ministry of Science and Higher Education as a part of the grant No. 075-15-2021-1362.

ABOUT AUTHORS

Lapshin Vasilii Vladimirovich, senior engineer researcher, LLC The Scientific and Production Association Aspherica”, lapshin_v@aspherica.ru, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-6971-8534

Zakharevich Evgeniy Mefodievich, chief technologist, LLC The Scientific and Production Association Aspherica”, zaharev@gmail.com, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-6997-3335

Narikovich Anton Sergeevich, research engineer, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.
ORCID: 0000-0003-2570-1818

Korotkov Aleksandr Sergeevich, laboratory assistant, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.
ORCID: 0000-0001-9425-8368

Lyatun Ivan Igorevich, Researcher, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.
ORCID: 0000-0002-4988-8077

Snigirev Anatoly Alexandrovich, Cand. of Sciences(Math.&Phys), Professor, Head of the International Science Research Center “Coherent X-ray Optics for Megascience Facilities”, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.
ORCID: 0000-0002-8892-1925

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

Lapshin V. V., Zakharevich E. M.: development of technology for manufacturing punches, technology for filling grinding heads; Narikovich A. S.: analysis of the literature, description of the results, formation of the conclusions of the study; Korotkov A. S.: collection of experimental data, tabular and graphical presentation of the results; Lyatun I. I.: setting up a research methodology, conducting research and forming research conclusions; Snigirev A. A.: significant contribution to the concept and design of the research, carried out a critical review of the article for important intellectual content, approved the final version of the article before submitting it for publication.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. The article was prepared on the basis of work by all members of the team of authors. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.

105318, город Москва, Площадь Семёновская,
дом 7, корпус 1, помещение 1, этаж 1, комната 27
телефон/факс: (499) 700-88-20
ИНН/КПП: 7719496782/771901001
ОГРН: 1197746563981
www.aspherica.ru

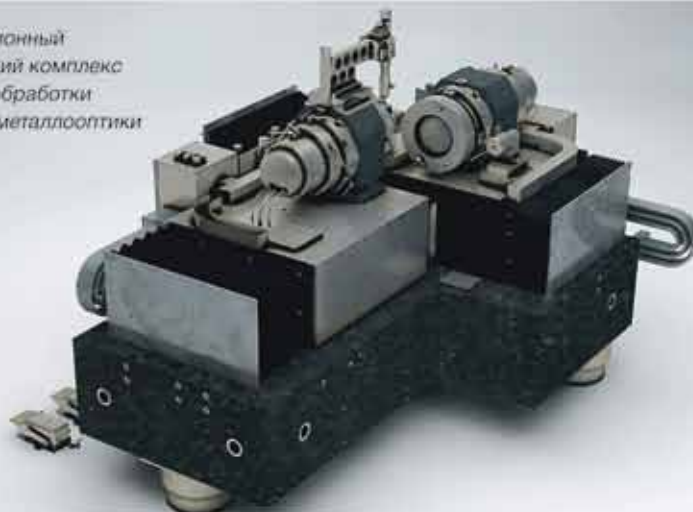


НПО АСФЕРИКА
ПРЕЦИЗИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ПРОИЗВОДСТВО ПРЕЦИЗИОННЫХ И УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

«НПО Асферика» разрабатывает и производит прецизионные и ультрапрецизионные технологические комплексы и компоненты, которые применяются для сверхточной обработки кристаллов, деталей металлооптики, плунжерных пар, а также деталей из различных сверхтвёрдых материалов по техническому заданию заказчика.

Ультрапрецизионный технологический комплекс УТМ 250 для обработки кристаллов и металлооптики



ПРОИЗВОДСТВО ПРЕЦИЗИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

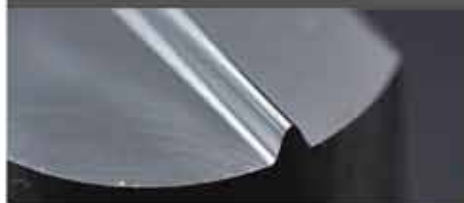
- АЭРОСТАТИЧЕСКИЕ ШПИНДЕЛЬНЫЕ УЗЛЫ И ПОВОРОТНЫЕ СТОЛЫ
- АЭРОСТАТИЧЕСКИЕ ПОДПЯТНИКИ ДЛЯ КИМ
- АЭРОСТАТИЧЕСКИЕ СУППОРТЫ

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ

- АЛМАЗНОЕ ТОЧЕНИЕ
- ТОЧЕНИЕ С УЛЬТРАЗВУКОМ
- АЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ
- ТВЕРДОЕ ТОЧЕНИЕ
- АЛМАЗНОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ (FLY CUTTING)

ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- КРИСТАЛЛЫ
- ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И ИХ СПЛАВЫ
- ЗАКАЛЁННАЯ СТАЛЬ
- ТВЁРДЫЕ СПЛАВЫ
- ОРГАНИЧЕСКОЕ СТЕКЛО



Материал: твёрдый сплав
Высота профиля: 0,5 мм
Точность формы: 1 мкм.



Материал: германий
Шероховатость: Ra 0,01 мкм
Неплоскость: 1 мкм



Материал: КРС-5
Шероховатость: Ra 0,01 мкм
Неплоскость: 0,8 мкм



Материал: закалённая сталь
Некрутость: 0,4 мкм
Нецилиндричность: 1 мкм

