

## МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА НЕПОЛНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯХ ПЕРЕКИДНЫХ

Л. М. Акулович<sup>1</sup>, Л. Е. Сергеев<sup>2</sup>, С. К. Дубновицкий<sup>3</sup>, М. Д. Атрошчик<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Д. т. н., профессор, профессор кафедры технологии металлов УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь; e-mail: leo-akulovich@yandex.ru

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии металлов УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь; e-mail: l.sergeev.mail@gmail.com

<sup>3</sup> Директор филиала Учреждения образования «Брестский государственный технический университет» Пинский индустриально-педагогический колледж, Пинск, Беларусь; e-mail: sertim@lut.by

<sup>4</sup> Студент УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь; e-mail: atroshchik1@yandex.by

### Реферат

Рассмотрены особенности финишной абразивной обработки неполных сферических поверхностей инструментом, сформированным энергией магнитного поля. Процесс микрорезания производится постоянно обновляющимися кромками зерен, что повышает производительность съема металла. Предложена конструкция полюсных наконечников с концентраторами магнитного поля. Представлен способ принципиально нового типа роторных станков, обеспечивающих высокую степень автоматизации и непрерывности производства. Установлено, что при использовании метода MAO осуществлена финишная обработка переключателей коммутационной аппаратуры из алюминиевого сплава АЛ3 ГОСТ 2685-75 и достигнута шероховатость поверхности  $Ra_2=0,08-0,04$  при исходной  $Ra_1=0,32$  мкм.

**Ключевые слова:** шлифование, неполные сферические поверхности, магнитно-абразивная обработка, шероховатость, роторный станок.

### MAGNETIC ABRASIVE MACHINING OF INCOMPLETE SPHERICAL SURFACES ON JUMP SWITCHES

L. M. Akulovich, L. E. Sergeev, S. K. Dubnovitsky, M. D. Atroshchik

### Abstract

The features of finishing abrasive processing of incomplete spherical surfaces with a tool generated by the energy of a magnetic field are considered. The micro-cutting process is carried out with constantly renewing grain edges, which increases the productivity of metal removal. The design of pole pieces with magnetic field concentrators is proposed.

A method of a fundamentally new type of rotary machine tools, providing a high degree of automation and production continuity, is presented. It was found that when using the MAO method, the finishing treatment of the switches of the switching equipment from the aluminum alloy AL3 GOST 2685-75 was carried out and the surface roughness  $Ra_2 = 0.08 - 0.04$  was achieved with the initial  $Ra_1 = 0.32$  microns.

**Keywords:** grinding, incomplete spherical surfaces, magnetic abrasive machining, roughness, rotary machine.

### Введение

В конструкциях машин и механизмов широко применяют детали с неполными сферическими поверхностями, например, шарниры рулевого управления, подвески и механизмы переключения передач мобильных машин, шарниры механизмов копирования зерноуборочных комбайнов [1], шаровые заглушки запорной арматуры, переключатели контактных коммутационных аппаратов для ручного управления наводными и воздушными судами. Неполные сферические поверхности также находят применение в изделиях медицинского назначения для эндопротезирования тазобедренного сустава человека [2]. К сферическим поверхностям указанных изделий предъявляются высокие требования в части обеспечения их точности и шероховатости. Для изготовления деталей с неполными сферическими поверхностями используют [3] различные методы формообразования – литье, прессование, порошковая металлургия и обработка резанием на станках с числовым программным управлением либо на специальных станках, позволяющих осуществлять совокупность взаимосвязанных формообразующих движений. Применяемая в производстве технологическая цепочка изготовления таких деталей включает различные методы формообразования поверхностей на заготовительных операциях и последовательную совокупность лезвийной и абразивной обработки. Набор технологических операций обусловлен видом материала заготовки, термической обработки, а также требованиями, предъявляемыми к обрабатываемому изделию. На финишных операциях точность и показатели качества неполных сферических поверхностей обеспечиваются как высокоскоростной лезвийной [4, 5], так и абразивной обработкой [6]. Высокоскоростная лезвийная обработка сферических поверхностей невозможна без использования инструментов из синтетических сверхтвердых материалов и дорогостоящих специальных станков, оснащенных высокоскоростными приводами и шпинделями. Поэтому в настоящее время среди финишных методов доминирует абразивная обработка, которая

нередко является единственно возможным способом обеспечения требуемого качества сферической поверхности.

Общим недостатком шлифования при жестком креплении абразивного зерна в связке является наличие у абразивных зерен отрицательных передних углов и скругленных вершин, что при малых глубинах микрорезания и высоких скоростях вызывает интенсивное их проскальзывание по обрабатываемой поверхности. В результате этого температура обрабатываемой поверхности резко возрастает, что может привести к структурным изменениям, появлению в поверхностном слое прижогов и внутренних растягивающих напряжений. Для устранения возникших при шлифовании погрешностей формы и разброса параметров шероховатости требуется проведение дополнительных доводочных операций.

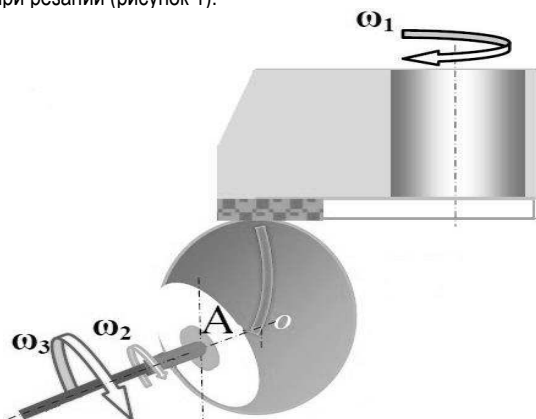
Целью исследования является разработка технологических решений финишной обработки неполных сферических поверхностей инструментом с подвижно-скоординированными абразивными зернами, обеспечивающих стабильность параметров шероховатости без проведения дополнительных доводочных операций.

### Результаты исследований

В машиностроении среди способов шлифования сферических поверхностей наибольшее применение получили шлифование профильными кругами, режущая кромка которых формирует профиль обрабатываемой поверхности методом копирования, и торцевыми шлифовальными кругами, режущая кромка которых программно отражает топологию обрабатываемой поверхности. Недостатками шлифования профильными кругами являются необходимость изготовления для каждого диаметра сферической поверхности специального абразивного инструмента и периодической его правки.

Шлифование сферических поверхностей торцом круга представлено на примере финишной обработки головок эндопротезов тазобедренного сустава человека [7]. К недостаткам данного спосо-

ба следует отнести сложную кинематику движения, обеспечивающего синхронизацию угловых скоростей, а точечный контакт торцевой поверхности шлифовального круга с обрабатываемой сферической поверхностью затрудняет достижение стабильности параметра шероховатости по причине неравномерного размерного съема материла при резании (рисунок 1).

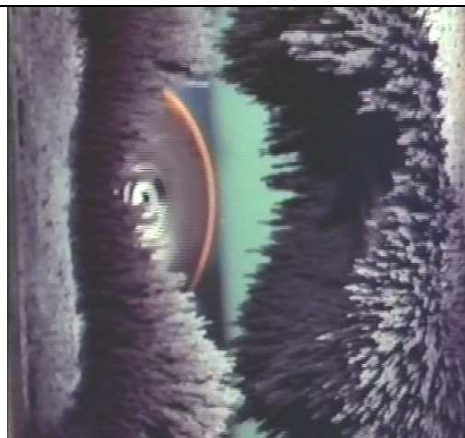


$\omega_1$  – угловая скорость шлифовального круга, рад/с;  $\omega_2$  – угловая скорость детали, рад/с;  $\omega_3$  – угловая скорость шарнира, рад/с

**Рисунок 1** – Схема шлифования неполной сферы с использованием торцевого шлифовального круга

Альтернативным вариантом финишной обработки сферических поверхностей является технология магнитно-абразивной обработки (МАО), для реализации которой не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править, так как он автоматически формируется магнитным полем, что в 2...3 раза снижает затраты на инструмент. В отличие от высокоскоростной лезвийной обработки и шлифования, где реализуется «точечный контакт», при МАО сформированная магнитным полем абразивная «щетка» из зерен ферроабразивного порошка (ФАП) охватывает обрабатываемую поверхность (рисунок 2) и обеспечивает согласно классификации Л. Н. Кошкина [8] «поверхностный контакт» режущего контура, что повышает производительность и качество обработки. Преимуществами МАО являются [9]: обеспечение стабильности физико-механических показателей качества поверхностного слоя детали ввиду отсутствия жесткого крепления абразивного зерна в связке; совмещение черновой, чистовой и финишной обработки без смены технологических баз и позиционирования детали; осуществление размерной и безразмерной обработки, обеспечивающей съем металла (0,002÷0,5) мм за (10÷120) с.

Вместе с тем существует задача обеспечения шероховатости неполных сферических поверхностей деталей, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, обусловленная трудностью удаления дефектов, образованных предшествующей механической обработкой. Известно, что электрохимическое полирование обеспечивает требуемое качество поверхности только на чистом алюминии (99,99%) или его сплавах с обязательным содержанием магния [10]. Вариант решения этой проблемы с применением МАО рассмотрим на примере обработки переключателей перекидных коммутационной аппаратуры с размерами  $L = 30$  мм,  $d = 8$  мм, изготавливаемых из алюминиевых сплавов АЛ3 ГОСТ 2685-75 (рисунок 3). Переключатели перекидные служат для прямого (ручного) управления коммутацией электрических цепей агрегатов, потребляемый ток в которых не превышает 35А. Они характеризуются наличием неполной сферической поверхности, которая работает в условиях шарового сочленения. Решение указанной задачи непосредственно связано с разработкой и внедрением принципиально нового типа станков, обеспечивающих высокую степень автоматизации и непрерывности производства. Например, роторные системы, транспортное движение которых согласовано таким образом, чтобы перемещение заготовок для каждой последующей обработки не имело остановок в их общем потоке. Использование роторных машин приводит к сокращению производственных площадей и рабочей силы в 4÷5 раз, а продолжительность рабочего цикла отработки уменьшается в сотни раз. Главное отличие роторных станков от традиционно применяемого оборудования машин заключается в его размещении в замкнутых конвейерах [11].



**Рисунок 2** – Фотография ферроабразивной «щетки» в рабочем зазоре



**Рисунок 3** – Фотография перекидного переключателя коммутационной аппаратуры после МАО

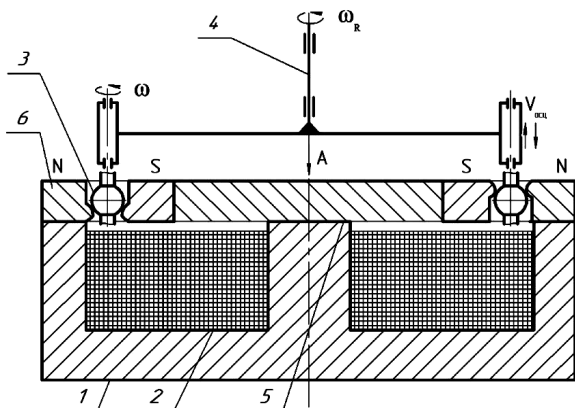
На рисунке 4 представлена рабочая зона роторного станка МАРС-15. Станок включает станину с концевым магнитопроводом, на котором расположены полюсные наконечники. Внутреннюю часть магнитопровода охватывает электромагнитная система (ЭМС). Работа станка производится следующим образом: включается ЭМС, в рабочий зазор между полюсными наконечниками помещают деталь, туда же подают ФАП и смазочно-охлаждающее технологическое средство (СОТС), которые заполняют рабочую зону.



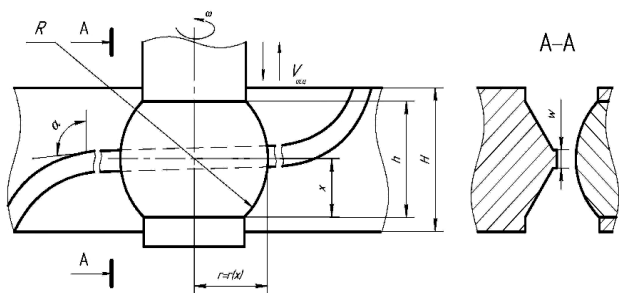
**Рисунок 4** – Фотография рабочей зоны станка МАРС-15

Детали одновременно сообщают вращение вокруг собственной оси с угловой скоростью  $\omega$ , движение по кольцевому рабочему зазору с линейной скоростью  $V$  и осциллирующее движение со скоростью  $V_{осц}$ . При перемещении детали по указанным координатам осуществляется последовательная обработка всех элементарных участков ее сложнопроводной поверхности. По данным [12] за 30 секунд обработки при перепаде диаметральных размеров до 6 мм производится равномерный съем по высоте криволинейной образующей детали (материал – сталь У10А ГОСТ 1435–90, твердость

58±62 HRC), причем шероховатость уменьшается с  $Ra_1$  (1,8±2,0) мкм до  $Ra_2$  (0,1±0,2) мкм. Однако при увеличении перепада диаметральных размеров стабильность параметров качества обработки резко падает. Предложение, направленное на устранение данного недостатка, заключалось в возможности регулирования режимами обработки. Но если ранее эффективность этого предложения была обусловлена относительно невысокими скоростями обработки, то в настоящее время современные типы роторных станков для МАО обладают производительностью в пределах 500...700 деталей в час. При таком темпе и автоматическом режиме обработки постоянное оперативное вмешательство в ход процесса практически исключено, и для выполнения условий его нормального протекания необходимо вводить систему активного контроля, что увеличивает себестоимость выпускаемой продукции. Однако при МАО сложнопрофильных поверхностей тел вращения типа неполной сферы данная схема не обладает требуемой производительностью.



1 – основание; 2 – электромагнитная катушка; 3 – деталь; 4 – вал привода деталей; 5 – магнитопровод; 6 – полюсные наконечники  
Рисунок 5 – Схема устройства для МАО деталей:



$R$  – радиус усеченной сферы, мм;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;  $V_{осц}$  – скорость осцилляции, м/с;  $x$  – высота точки усеченной сферы в текущий момент времени, мм;  $h$  – высота усеченной сферы, мм;  $H$  – высота полюсного наконечника, мм;  $r(x)$  – текущая координата, мм;  $\alpha$  – угол наклона концентратора магнитного поля, град;  $W$  – высота концентраторов магнитного поля, мм  
Рисунок 6 – Схема взаимодействия детали с концентратором МП в произвольном сечении перпендикулярно ее оси

Поэтому при использовании такого устройства элементарные участки поверхности сложнопрофильной детали, расположенные на разных диаметральных сечениях детали в ходе ее движения по круговому рабочему зазору обрабатываются неравномерно. Это происходит потому, что наружные точки каждого диаметрального сечения детали находятся на разном расстоянии от оси вращения и соответственно имеют разную скорость перемещения.

Будем исходить из условия равномерности съема материала для любой точки обрабатываемой поверхности. Для этого требуется определить характер (вид) кривой, образованной концентраторами МП полюсных наконечников на их развертке, когда при вращении детали с угловой скоростью  $\omega$ , одновременной осцилляцией со скоростью  $V_{осц}$  и ее движении по круговому зазору с линейной скоростью  $v(x)$ , время обработки элементарных участков обрабатываемой поверхности является одинаковым для любой ее точки по всей высоте  $H$  обрабатываемой поверхности.

Данное условие будет выполнено, если каждая точка обрабатываемой поверхности будет находиться в контакте с ФАП в магнитном поле одинаковое время. Магнитно-абразивное устройство для реализации этого условия представлено на рисунке 5. Рассмотрим схему взаимодействия детали с концентратором МП в произвольном сечении перпендикулярно ее оси, которая показана на рисунке 6.

Пусть  $S_1$  и  $S_2$  – путь, пройденный точкой окружности  $r(x)$  вдоль концентратора МП для полюсов  $N$  и  $S$  магнитной системы, а  $t_1$  и  $t_2$  – соответственно время прохождения.

Тогда:

$$S_1 = (v(x) + v_n) \cdot t_1, \text{ м;}$$

$$S_2 = (v(x) + v_n) \cdot t_2, \text{ м,}$$

где  $v(x)$  и  $v_n$  – соответственно линейная и переносная скорости движения точки.

Поскольку  $v_n \ll v(x)$ , то переносной скоростью пренебрегаем. Если еще учесть, что длина концентраторов для первого и второго полюсов магнитной системы в произвольном сечении перпендикулярно оси детали одинакова, то можно записать  $S_1 = S_2 = S(x)$ . Таким образом, время прохождения точки окружности детали вдоль обоих полюсов одинаково ( $t_1 = t_2$ ), что позволяет в дальнейшем рассматривать характер (вид) кривой, образованной концентратором МП на одном полюсе магнитной системы.

Рассмотрим развертку рабочей поверхности полюса магнитной системы. Запишем главное условие – постоянство времени нахождения любой точки обрабатываемой поверхности детали в контакте с ФАП:

$$\frac{S(x)}{v(x)} = const.$$

Выразив линейную скорость через угловую, получим:

$$v(x) = \omega \cdot r(x) \text{ или } \frac{S(x)}{\omega \cdot r(x)} = const.$$

Поскольку угловая скорость вращения детали постоянна, то:

$$\frac{S(x)}{r(x)} = C = const.$$

Из рисунка 6 следует, что:

$$S(x) = w \cdot tg\alpha(x) = w \cdot f'(x),$$

где  $w$  – высота концентратора МП вдоль оси детали, мм;

$\alpha$  – угол между касательной к образующей концентратора МП и осью детали.

После преобразования получим:

$$f'(x) = \frac{S(x)}{w} = \frac{C}{w} \cdot r(x);$$

$$f(x) = \frac{C}{w} \cdot \int_0^x r(x_i) \cdot dx_i + C_1. \quad (2)$$

Теперь определим константу  $C$ , для чего выразим значение шага в конечной точке детали по высоте ( $x=H$ ):

$$f(H) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{k}, \quad (3)$$

где  $k$  – число концентраторов МП на развертке поверхности полюсного наконечника.

Приравняем выражения (2) и (3):

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot R}{k} = \frac{C}{w} \cdot \int_0^H r(x_i) \cdot dx_i$$

после преобразований получим:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot w}{k \cdot \int_0^H r(x_i) \cdot dx_i} \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в выражение (2), окончательно имеем:

$$f(x) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{k \cdot \int_0^H r(x_i) \cdot dx_i} \cdot \int_0^x r(x_i) \cdot dx_i.$$

Согласно искомому уравнению, например, для сферической формы обрабатываемой поверхности деталей расположение центра МП на полюсном наконечнике имеет вид одной ветви гиперболы:

$$f(x) = \frac{2\pi n \cdot v}{\omega} \cdot \frac{\arcsin \frac{R-x}{R+h}}{\arcsin \frac{R-h}{R+h}} \quad (5)$$

Для сравнительных испытаний были изготовлены полюсные наконечники из стали 10 ГОСТ 1050-88 в соответствии с уравнением (5). Высота концентраторов МП составляла  $w = 2$  мм. Исходная шероховатость поверхности перекидных переключателей коммутационной аппаратуры составляла  $Ra_1 = 0,32$  мкм. После обработки на трех поперечных сечениях измерялась достигаемая шероховатость поверхности, которая составила величину  $Ra_2 = (0,08 \pm 0,04)$  мкм. Значения шероховатости были определены контурографом-профилографом ХСР-20.

Параметры и режимы МАО перекидных переключателей коммутационной аппаратуры: скорость вращения перекидных переключателей,  $(0,5 \div 1,5)$  м/с; частота вращения ротора, 0,5 об/мин; амплитуда осцилляции,  $A = 2,5$  мм; величина рабочего зазора,  $\delta = 1$  мм; магнитная индукция,  $B = 0,9$  Тл; коэффициент заполнения рабочего зазора,  $K_3 = 1$ ; время обработки,  $t = 10$  с. В качестве ФАП использовался порошок на основе кремниевого сплава Fe – SiC (рисунок 7). СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176 – 1, 3%-й водный раствор. Указанный комплекс движений перекидных переключателей коммутационной аппаратуры на станке МАРС-15 создает условия для увеличения давления ФАП на обрабатываемую поверхность в сравнении с традиционной схемой МАО, обеспечивая повышение съема металла на 20 %.

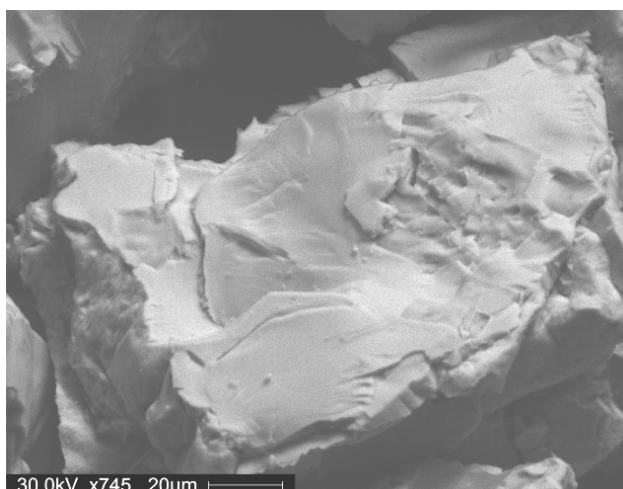


Рисунок 7 – Фотография ферроабразивного порошка (Fe – SiC)

#### Заключение

Предложена конструкция полюсных наконечников с концентраторами МП высотой  $w = 2$  мм, выполненными в соответствии с формулой (5), обеспечивает постоянный рабочий зазор между поверхностью переключателей коммутационной аппаратуры и полюсным наконечником. Эта формула для поверхности в виде усеченной сферы принимает вид:

$$f(x) = \frac{2\pi n \cdot v}{\omega} \cdot \frac{\arcsin \frac{R-x}{R+h}}{\arcsin \frac{R-h}{R+h}}$$

Установлено, что при использовании метода МАО осуществлена финишная обработка переключателей коммутационной аппаратуры из алюминиевого сплава АЛ3 ГОСТ 2685-75 и достигнута шероховатость поверхности  $Ra_2 = 0,08 - 0,04$  при исходной  $Ra_1 = 0,32$  мкм.

#### Список цитированных источников

1. Попов, В. Б. Подъемно-навесные устройства универсальных энергетических средств / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2016. – № 1. – С. 3–11.

2. Лоскутов, А. Е. Эндопротезирование тазобедренного сустава. Состояние проблемы / А. Е. Лоскутов, И. А. Никифоров // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2002. – № 1. – С. 94–101.
3. Гречишников, В. А. Режущий инструмент. Альбом ПГТУ / В. А. Гречишников, А. Г. Схиртладзе, В. А. Иванов, В. К. Перевозников. – Пермь : ПГТУ, 2007. – 436 с.
4. Финишная обработка поверхностей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 377 с.
5. Хмельницкий, Р. С. Технология скоростной обработки неполных сферических поверхностей деталей машин вращающимся лезвийным инструментом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р. С. Хмельницкий. – Минск : БНТУ, 2018. – 27 с.
6. Акулович, Л. М. Формирование качества сложнопрофильных поверхностей при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, А. А. Тиунчик, Е. В. Сенчуров. – Минск : БГАТУ, 2016. – 296 с.
7. Турманидзе, Р. С. Разработка методики подбора материалов для имплантов тазобедренного сустава человека и технологии их обработки с достижением высокой точности и качества сферических поверхностей / Р. С. Турманидзе // Резание и инструмент в технологических системах. – 2015. – № 85. – С. 296–308.
8. Кошкин, Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии / Л. Н. Кошкин. – М. : Машиностроение. – 1986. – 320 с.
9. Акулович, Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ. – 2013. – 372 с.
10. Белецкий, В. М. Справочник. Алюминиевые сплавы / В. М. Белецкий, В. А. Кривов; под общей редакцией академика РАН И. Н. Фридляндера. – Киев : КОМИНТЕХ. – 2005. – 364 с.
11. Клусов, И. А. Технологические системы роторных машин / И. А. Клусов. – М. : Машиностроение. – 1976. – 232 с.
12. Сакулевич, Ф. Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка / Ф. Ю. Сакулевич, Л. М. Кожуро. – Минск : Наука и техника, 1978. – 168 с.

#### References

1. Popov, V. B. Lifting-hinged devices of universal power facilities / V. B. Popov // Vestn. Gomel. state tech. un-ta them. P. O. Sukhoi. – 2016. – № 1. – P. 3–11.
2. Loskutov, A. E. Endoprosthetics of the hip joint. State of the problem / A. E. Loskutov, I. A. Nikiforov // Orthopedics, traumatology and prosthetics. – 2002. – № 1. – P. 94–101.
3. Grechishnikov, V. A. / Cutting tool. Album of PSTU / V. A. Grechishnikov, A. G. Skhirtladze, V. A. Ivanov, V. K. Perevoznikov. – Perm : PSTU. – 2007. – 436 p.
4. Finish surface treatment / S. A. Klimenko [and others]; under total. ed. S. A. Chizhik and M. L. Heifetz. – Minsk : Belarus. Navuka, 2017. – 377 p.
5. Khmelnsky, R. S. Technology of high-speed processing of incomplete spherical surfaces of machine parts with a rotating blade tool: author. dis. ... Cand. tech. Sciences / R. S. Khmelnsky. – Minsk : BNTU, 2018. – 27 p.
6. Akulovich, L. M. Formation of the quality of complex-profile surfaces during magnetic-abrasive processing / L. M. Akulovich, L. E. Sergeev, A. A. Tiunchik, E. V. Senchurov. – Minsk : BSATU, 2016. – 296 p.
7. Turmanidze, R. S. Development of a method for selecting materials for human hip joint implants and technology for their processing with the achievement of high accuracy and quality of spherical surfaces / R. S. Turmanidze // Cutting and tools in technological systems. – 2015. – № 85. – P. 296–308.
8. Koshkin, L. N. Rotor and rotor-conveyor lines / L. N. Koshkin. – M. : Mechanical engineering, 1986. – 320 p.
9. Akulovich, L. M. Technology and equipment for magnetic-abrasive treatment of metal surfaces of various profiles / L. M. Akulovich, L. E. Sergeev. – Minsk : BSATU, 2013. – 372 p.
10. Beletsky, V. M. Handbook. Aluminum alloys / V. M. Beletsky, V. A. Krivov; under the general editorship of Academician of the Russian Academy of Sciences I. N. Fridlyander. – Kiev : COMINTECH, 2005. – 364 p.
11. Klusov, I. A. Technological systems of rotary machines / I. A. Klusov. – M.: Mechanical engineering, 1976. – 232 p.
12. Sakulevich, F. Yu. Volume magnetic abrasive treatment / F. Yu. Sakulevich, L. M. Kozhuro. – Minsk : Science and technology, 1978. – 168 p.

Материал поступил в редакцию 30.10.2020