



Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности

В. А. Скрябин

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

(г. Пенза, Россия)

vs_51@list.ru

Введение. В статье приводятся новые конструкторские решения, используемые при проектировании оборудования для финишной обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности. Данные решения позволяют осуществлять планетарное вращение детали при малом межосевом расстоянии оправки с обрабатываемой деталью и шпинделем установки, что способствует повышению качества обработки рабочих поверхностей детали и снижению энергетических затрат.

Материалы и методы. Недостатками ранее применявшихся устройств для финишной обработки деталей сложного профиля являются увеличенное потребление энергии, а также достаточно большое межосевое расстояние между деталью и шпинделем установки, что снижает качество обработки поверхностей и уменьшает номенклатуру деталей по массовым и габаритным характеристикам. В этом случае необходимо применение новых решений по изменению конструкции установки. За счет конструктивных наработок уменьшено межосевое расстояние между деталью и шпинделем установки, что способствует уменьшению вибраций, улучшению качества обработки поверхностей и увеличению номенклатуры изделий.

Результаты исследования. Правильность принятых решений подтверждается проведенными расчетами по снижению сопротивления абразивной среды, воздействующей на поверхности лопаток колеса турбокомпрессора дизеля. Также проведены расчеты детали на прогиб с использованием программы продукта Solid Works 2016. Расчеты показали достаточную надежность установки при обработке деталей средних и крупных размеров по сравнению с базовым вариантом установки, ранее изготовленной Пензенским государственным университетом для АО «Пензадизельмаш».

Обсуждение и заключение. Выполненные расчеты позволили установить, что сокращение межосевого расстояния снижает прогиб и вибрации в процессе финишной обработки деталей, а также позволяет с меньшими энергозатратами стабилизировать качество и производительность процесса обработки поверхностей сложного профиля. Разработана и изготовлена новая конструкция установки, позволяющая обеспечить планетарное вращение детали при малом межосевом расстоянии оправки с деталью и шпинделем устройства.

Ключевые слова: теоретическое исследование, результат теоретического исследования, сложная поверхность, поверхность детали, незакрепленные абразивные частицы, производительность, качественный показатель, проектирование оборудования, автоматизация конструкторского расчета

Для цитирования: Скрябин В. А. Установка для обработки деталей со сложным профилем рабочей поверхности // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 552–561. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.552-561>





The Installation for Processing of Parts with a Complex Profile of Working Surface

V. A. Skryabin

Penza State University (Penza, Russia)

vs_51@list.ru

Introduction. The article presents new solutions for designing the equipment for final processing parts with a complex profile of working surface. The said solutions allow a planetary rotation of the part at a small center distance of the mandrel with the workpiece and the spindle of the installation. This solution improves the quality of the working surfaces and reduces energy costs.

Materials and Methods. The disadvantage of modern devices for final processing of complex parts is the increased energy consumption and the large axial distance between the part and spindle. These factors reduce the quality of processing and the part range in terms of weight and dimension characteristics. The application of new solutions to change the design of the installation is relevant. When designing a new installation, the center distance between the part and the spindle was reduced. This contributed to the reduction of vibrations, improving the quality of surface treatment and increasing the product range.

Results. The calculations to reduce the resistance of the abrasive medium affecting on the surface of the diesel engine turbo-compressor wheel blades confirmed the expediency of the solution. The calculations of the part for deflection by using Solid Works 2016 software were carried out. The calculations demonstrated the reliability of the installation when processing parts of medium and large sizes as compared to the basic installation option previously made by Penza State University for Penzadieselmash Company.

Conclusions. The calculations made it possible to find that the reduction of the center distance reduces the deflection of parts and vibration in the process of finishing and allows stabilizing the quality and performance of processing the surfaces of a complex profile with less energy coast. A new design of the installation was developed and manufactured. It contributes to planetary rotation of the part at a small axial distance of the mandrel with the part and the spindle of the device.

Keywords: theoretical study, result of study, complex surface, part surface, loose abrasive particles, performance, quality indicator, equipment design, design calculation automation

For citation: Skryabin V. A. The Installation for Processing of Parts with a Complex Profile of Working Surface. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):552–561. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.552-561>

Введение

Финишная абразивная обработка деталей сложной геометрической формы уплотненными абразивными средами является одним из наиболее производительных процессов. Однако использование разработанных ранее методов и оборудования не всегда соответствует потребностям производства в достижении необходимой производительности и качества обработки деталей сложной формы, в частности, цельнолитых колес турбин турбокомпрессоров из труднообрабатываемых материалов.

В статье приводятся решения проблемных вопросов обработки среднегабаритных деталей со сложными рабочими поверхностями второго порядка, в частности, колеса турбины турбокомпрессора дизеля. Получение качественных характеристик поверхностного слоя и обеспечение заданной производительности обработки достаточно просто осуществить путем полирования вышеуказанных поверхностей в среде незакрепленных абразивных зерен, уплотненных сжатым воздухом через специальную гибкую оболочку на специальной установке. Обработ-

ка этих поверхностей на шлифовальной машинке жестким шлифовальным кругом занимает много времени и не может обеспечить полную обработку всех лопаток колеса, т. к. они расположены близко друг к другу, имеют малый угловой шаг и труднодоступны для обработки всей площади сложных поверхностей.

Обзор литературы

На базе Пензенского государственного университета в 1975 г. впервые в мировой практике были созданы и запатентованы методы обработки сложнопрофильных деталей уплотненным абразивом, а также установки для их реализации. Данная технология и оборудование нашли широкое применение во многих промышленных регионах России и других стран. Большой вклад в создание технологии и оборудования для финишной абразивной обработки внесли ученые Пензенского государственного университета: А. Н. Мартынов, В. З. Зверовщиков, А. Е. Зверовщиков, В. А. Скрыбин и др.

А. Н. Мартыновым проведены теоретические и экспериментальные исследования, дано методологическое обоснование нового метода финишной обработки деталей незакрепленным абразивом, уплотненным инерционными силами [1]. Теоретические и экспериментальные исследования В. З. Зверовщикова посвящены вопросам динамики центробежной обработки деталей дискретным шлифовальным материалом, уплотненным инерционными силами [2–3]. В работах А. Е. Зверовщикова исследуется технологическое обеспечение качества поверхностей деталей при многофункциональной центробежно-планетарной объемной обработке [4–5]. Все вышеперечисленные научные работы посвящены финишной обработке сложнопрофильных деталей из различных материалов небольшого размера со следующими параметрами: диаметр – 20–50 мм, длина – 80–100 мм, масса – 0,020–0,050 кг.

Необходимо отметить, что основным недостатком вышеперечисленных исследований является невозможность обработки сложнопрофильных деталей среднего и крупного типоразмера, а также достаточно сложная кинематика установок. Кроме того, все рассматриваемые установки достаточно энергоемки.

Большая заслуга в систематизации разработанных методов абразивной обработки с указанием их недостатков и создании на этой основе нового метода финишной абразивной обработки деталей со статическим уплотнением сжатым воздухом незакрепленной абразивной среды принадлежит В. А. Скрыбину, разработавшему новый метод обработки сложнопрофильных деталей незакрепленным абразивом, уплотненным сжатым воздухом через эластичную оболочку [6–8].

Недостатком устройств, ранее применявшихся для финишной обработки деталей сложного профиля свободным абразивом, уплотненным давлением сжатого воздуха [1; 9–12], является увеличенное потребление энергии за счет достаточно большого межосевого расстояния между деталью и шпинделем установки. Это способствует повышению уровня вибраций, а также снижению качества обработки поверхностей и номенклатуры деталей по массовым и габаритным характеристикам.

Для решения данной проблемы необходимо внести изменения в конструкцию установки и методику определения рациональных режимов и условий обработки.

Материалы и методы

При использовании новой установки ее жестко закрепляют на столе вертикально- или радиально-сверлильного станка и соединяют со шпинделем.

Новое устройство для финишной обработки сложнопрофильных деталей и деталей с отклонениями от круглости содержит вал с оправкой, смонтированной с эксцентриситетом в корпусе

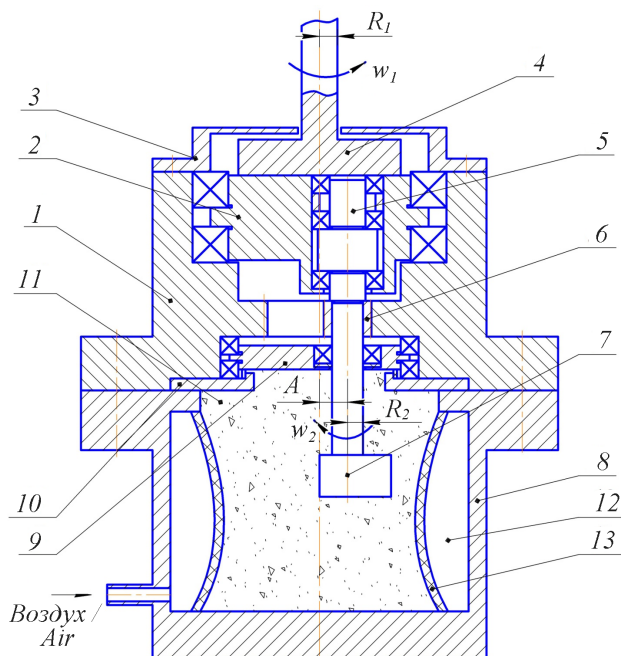


устройства; камеру, заполненную абразивной средой; привод вращения детали, установленный на входном валу; зубчатый венец, выполненный на валу с оправкой и кинематически связанный с зубчатым венцом, образованным на внутренней цилиндрической поверхности крышки устройства. Опорная крышка с валом с оправкой и уплотнительная крышка установлены в подшипниковых опорах.

Устройство позволяет снизить энергетические затраты, увеличить предел максимальной массы обрабатываемой детали, повысить качество поверхности путем уменьшения момента сопротивления абразивной среды, уменьшить вибрацию, а также способствует появлению жесткой связи, обеспечивающей вращение вала с оправкой посредством кинематической связи зубчатого венца вала с оправкой с зубчатым венцом корпуса крышки устройства. Снижение рычага сопротивления и увеличение максимальной массы

детали осуществляется путем сокращения межосевого расстояния меньшего, чем сумма радиусов входного вала и вала с оправкой [13–15].

Установка (рис. 1) состоит из контейнера 8, заполненного абразивной средой 11. В крышке 1, установленной на контейнере устройства, смонтированы опорная крышка 2 и защитная крышка 10 с подшипниковыми опорами. С опорной крышкой 2 жестко связан входной вал 4, передающий крутящий момент от привода станка к опорной крышке и обеспечивающий вращение детали относительно оси устройства. В опорную крышку 2 с эксцентриситетом установлен вал в подшипниках с оправкой 5, служащий для установки детали 7 в абразивную среду 11. На вал с оправкой 5 установлен зубчатый венец 6, который кинематически связан с зубчатым венцом, выполненным на крышке 1 устройства. Данная связь осуществляет вращение обрабатываемой детали 7 относительно собствен-



Р и с. 1. Схема установки

F i g. 1. Installation diagram

ной оси. Крышки 9 и 3 предохраняют внутренние механизмы устройства от воздействия абразива и внешней среды.

Устройство работает следующим образом.

На вал с оправкой 5, который установлен в корпусе крышки устройства, закрепляется деталь 7 (рис. 2). Крышка 1 устанавливается на корпус устройства 8, обеспечивая тем самым погружение детали в абразивную среду. Подача сжатого воздуха под давлением в полость контейнера 12 обеспечивает поджатие эластичными стенками 13 к детали 7 абразивной среды 11, за счет чего равномерно осуществляется контакт абразивных частиц с поверхностью детали. Крутящий момент передается валу 4, вращающемуся с угловой скоростью ω_1 от привода станка, и сообщает вращение опорной крышке 2 с установленной в ней валом с оправкой 5, тем самым обеспечивая вращение обрабатываемой детали 7 относительно оси устройства. Передача крутящего момента относительно оси заготовки осуществляется за счет контакта зубчатого венца 6 на валу с оправкой с зубчатой поверхностью крышки 1 устройства. В данном устройстве деталь с угловой

скоростью ω_2 совершает планетарное движение на малых межосевых расстояниях, обеспечивая при этом равномерный съем металла по всем поверхностям деталей сложного профиля.

Результаты исследования

Межосевое расстояние A между входным валом и валом с оправкой выбирается из условия:

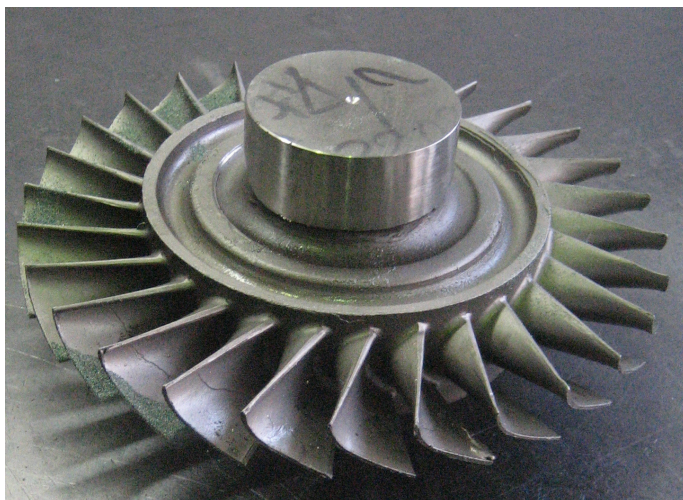
$$A \leq R_1 + R_2, \quad (1)$$

где R_1 – радиус входного вала; R_2 – радиус вала-оправки.

Для обработки деталей на базовой установке с межосевым расстоянием, равным 20 мм, сопротивление абразивной среды F_1 в единицу времени при угловой скорости $\omega = \omega_2 = 5$ рад/с определяем по формуле:

$$F_1 = S \cdot K_c \cdot P \cdot V, \quad (2)$$

где S – величина, пропорциональная поверхности сопротивления; K_c – коэффициент сопротивления абразивной среды; P – плотность обрабатываемой среды; V – линейная скорость движения детали. Поскольку движение заготовки совершается вокруг централь-



Р и с. 2. Колесо турбины турбокомпрессора дизеля
F i g. 2. Turbine wheel of diesel engine turbocharger



ной оси устройства, скорость заготовки определяется по формуле:

$$V = \omega \cdot R, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость заготовки; R – радиус окружности вращения с большим межосевым расстоянием.

Сопротивление абразивной среды определяется по следующей зависимости:

$$F_1 = S \cdot K_c \cdot P \cdot \omega \cdot R. \quad (4)$$

При использовании новой конструкции установки для абразивной обработки, обеспечивающей круговое движение на малых межосевых расстояниях, появилась возможность уменьшить межосевое расстояние A до 5 мм. Следовательно, сопротивление абразивной среды при обработке детали [9;10] будет определяться по следующей формуле:

$$F_1 = 0,25 \cdot S \cdot K_c \cdot P \cdot \omega \cdot R. \quad (5)$$

Сопротивление абразивной среды при обработке детали на базовой установке определяется по следующей зависимости [11–15]:

$$F_2 = S \cdot K_c \cdot P \cdot \omega \cdot R. \quad (6)$$

Отношение сопротивлений абразивной среде при обработке деталей на новой и базовой установках определяется как:

$$\frac{F_1}{F_2} = 0,25, \quad (7)$$

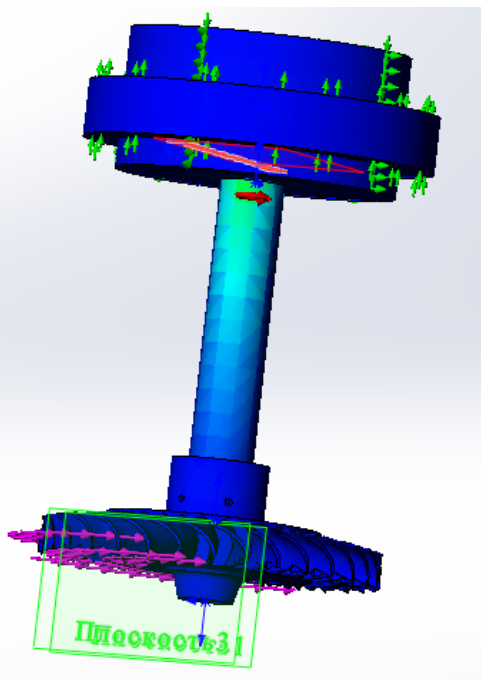
т. е. отношение радиусов к центру вращения; следовательно, сопротивление абразивной среды, оказываемое на обрабатываемую деталь в новой установке по сравнению с установкой с большим межосевым расстоянием, вычисляется по формуле:

$$F_1 = \frac{F_2}{\frac{R_2}{R_1}}, \quad (8)$$

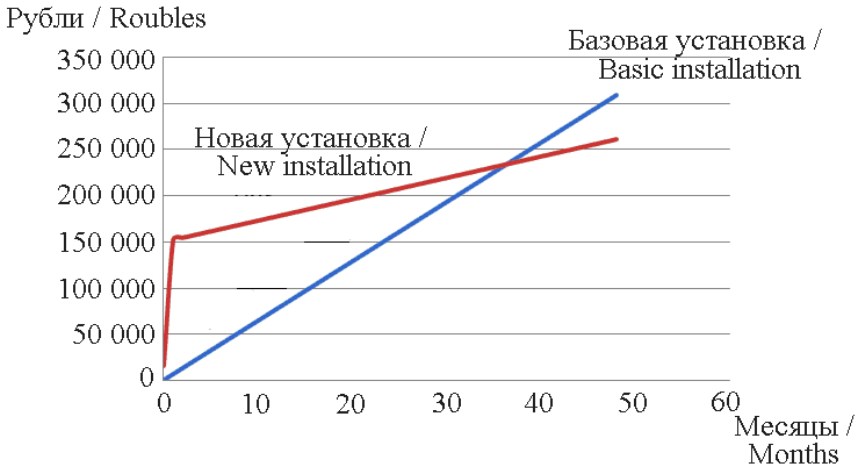
где R_2 – радиус вращения с межосевым расстоянием большим, чем сумма радиусов валов; R_1 – радиус вращения с межосевым расстоянием меньшим, чем сумма радиусов двух валов.

При различных межосевых расстояниях на новой и базовой установках при обработке деталей сложного профиля незакрепленной мелкодисперсной абразивной средой на новой конструкции установки (рис. 1) сопротивление абразивной среды снижается в $\frac{20}{5} = 4$ раза.

Рассчитан также прогиб оправки при абразивной обработке на новой установке с использованием программы Solid Works 2016. При симуляции в программном продукте исследования нагрузок на оправку и деталь, обрабатываемую в устройстве (рис. 3), давление абразивной среды составило 0,2 МПа.



Р и с. 3. Результаты исследования деформаций в конструкции
F i g. 3. Results of study of deformations in structure



Р и с. 4. Сравнение затрат при использовании базовой и новой установок в течение 48 месяцев
 F i g. 4. Comparison of costs for basic and new installations during 48-months period

Поскольку радиус вращения детали при ее обработке на базовой установке в 4 раза больше, чем в новой, для работы новой установки, согласно результатам экспериментальных исследований, требуется мощность двигателя в 4 раза меньше, чем в установке с увеличенным межосевым расстоянием A . Экономия средств S при работе на данной установке (рис. 4) в течение 1 ч составляет

$$S = (N_{\phi 2} - N_{\phi 1}) \cdot a, \quad (9)$$

где a – стоимость 1 кВт; $N_{\phi 2}$ – фактическая мощность двигателя для устройства с межосевым расстоянием большим, чем сумма радиусов валов; $N_{\phi 1}$ – фактическая мощность двигателя для устройства с межосевым расстоянием меньшим, чем сумма радиусов валов.

Подставив значения в формулу (8), получим:

$$S = (8 - 2) \cdot 3.53 = 21,18 \text{ руб.}$$

Экономия в год S_r при двусменном графике составляет

$$S_r = 21,18 \cdot 3\,968 = 84\,042,24 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости новой конструкции установки – 38 месяцев.

Обсуждение и заключение

1. Установлено, что при обработке сложнопрофильных деталей типа колес турбин турбокомпрессора наиболее эффективным способом является камерная обработка уплотненными мелкодисперсными абразивными средами с применением оборудования, состоящего из рабочей камеры и установленной в ней эластичной оболочки, с помощью которой давлением сжатого воздуха обеспечивается поджатие обрабатываемой среды к поверхности детали.

2. Предложена новая конструкция установки, позволяющая обеспечить планетарное вращение детали при малом межосевом расстоянии оправки с деталью и шпинделем устройства, что повышает качество обработки и уменьшает энергетические затраты.

3. Изучен характер воздействия абразивной среды на поверхность обрабатываемой детали, что дает возмож-



ность определить режимные параметры обработки.

4. Экспериментально установлено, что обработка поверхностей сложной формы колес турбин из труднообрабатываемых литейных сплавов марки ЖСЗДК с твердостью 40–45 HRC и исходной шероховатостью поверх-

ности $R_a = 3,2$ мкм на новой конструкции установки дает возможность уменьшить шероховатость обработанной поверхности с $R_a = 3,2-2,5$ мкм до $R_a = 0,80-0,63$ мкм. При этом на 8–10% повышается микротвердость поверхностного слоя на глубине 30–50 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Мартынов А. Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами : моногр. Саратов : Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 1981. 212 с.
2. **Зверовщиков В. З.** Динамика центробежной обработки деталей дискретным шлифовальным материалом : моногр. Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. 200 с.
3. **Зверовщиков В. З., Зверовщиков А. Е.** Динамические характеристики уплотненной массы рабочей загрузки при объемной центробежной обработке деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2007. № 1. С. 140–150. URL: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/files/izvuz_tn.pnzgu.ru/15107.pdf
4. **Зверовщиков А. Е.** Расширение технологических возможностей объемной центробежно-планетарной обработки // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 7. С. 17–23. URL: http://www.mashin.ru/eshop/journals/naukomkie_tehnologii_v_mashinostroenii/2013/27
5. **Зверовщиков А. Е.** Многофункциональная центробежно-планетарная обработка : моногр. М. : Инфра-М, 2016. 176 с.
6. А. с. 1579740 СССР, МКИ В24В 31/08. Способ абразивной обработки деталей / А. Н. Мартынов, В. А. Скрябин, В. М. Федосеев. Опубл. 23.07.90, Бюл. № 27.
7. **Скрябин В. А.** Особенности обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными абразивными средами // Вестник Мордовского университета. 2015. Т. 25, № 4. С. 72–89. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.025.201504.072>
8. А. с. 1805012 СССР, МКИ В 24 В 31/06. Способ камерной обработки свободным абразивом / А. Н. Мартынов, В. З. Зверовщиков, Е. З. Зверовщиков. Опубл. 30.03.93, Бюл. № 12.
9. **Скрябин В. А., Пшеничный О. Ф.** Моделирование процесса микрорезания при обработке деталей уплотненным слоем незакрепленного абразива // Машиностроение : респ. межвед. сб. Минск : Вышэйшая школа, 1988. Вып. 13. С. 33–37.
10. **Скрябин В. А.** Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом : моногр. Пенза : Изд-во ПВАИУ, 1992. 120 с.
11. **Скрябин В. А.** Производительность процесса обработки деталей статически уплотненным слоем абразивного микропорошка // Известия вузов (Сер. «Машиностроение»). 1994. № 4-6. С. 128–130.
12. **Скрябин В. А., Схиртладзе А. Г.** Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами : моногр. Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2015. 240 с.
13. **Скрябин В. А., Схиртладзе А. Г., Рыбаков Ю. В.** Новый метод финишной обработки деталей свободными мелкодисперсными средами // Технология металлов. 2003. № 2. С. 16–17.
14. **Скрябин В. А., Свечникова Г. И.** Экспериментальные исследования производительности финишной абразивной обработки деталей с различным профилем // Машиностроитель. 2011. № 4. С. 18–22. URL: <https://rucont.ru/efd/473243>

15. Патент 1803308 (РФ), МКИ: В24В 31/104. Способ обработки деталей / В. А. Скрябин // Опубл. 23.03.93, Бюл. № 11.

Поступила 20.09.2017; принята к публикации 02.04.2018; опубликована онлайн 28.12.2018

Об авторе:

Скрябин Владимир Александрович, профессор кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440000, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), доктор технических наук, ResearcherID: R-2385-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Martynov A. N. [*Fundamentals of the Method of Treating Details with a Free Abrasive Compacted by Inertial Forces: A Monograph*]. Saratov: Saratov University Publ., 1981. 212 p. (In Russ.)
2. Zverovschikov V. Z. [*Dynamics of Centrifugal Processing of Parts of Discrete Grinding Material: A Monograph*]. Penza: Penza State University Publ., 2005. 200 p. (In Russ.)
3. Zverovschikov V. Z., Zverovschikov A. E. [Dynamic characteristics of the compacted mass of the working load at a high volume centrifugal processing of parts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiye nauki* = Higher Education Institutions Bulletin. Volga Region. Technical Sciences. 2007; 1:140–150. Available at: https://izvuz_tn.pnzgu.ru/files/izvuz_tn.pnzgu.ru/15107.pdf (In Russ.)
4. Zverovschikov A. E. Expansion of technological capabilities of three-dimensional centrifugal planetary processing. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2013; 7:17–23. Available at: http://www.mashin.ru/eshop/journals/naukoemkie_tekhnologii_v_mashinostroenii/2013/27 (In Russ.)
5. Zverovschikov A. E. *Multifunctional Centrifugal Planetary Processing: A Monograph*. Moscow: Infra-M; 2016. 176 p. (In Russ.)
6. Certificate of Authorship No. 1579740 of the USSR, MКИ В24В 31/08. Method of abrasive treatment of details / Martynov A. N., Skryabin V. A., Fedoseev V. M. Publ. 23.07.90. Bulletin No. 27. (In Russ.)
7. Skryabin V. A. The features of the treatment of figurine details by close-settled fine abrasive media. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2015; 25(4):72–89. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.025.201504.072> (In Russ.)
8. Certificate of Authorship 1805012 of the USSR, MКИ 5 В24 31/06. Chamber method of processing free abrasive / Martynov A. N., Zverovschikov V. Z., Zverovschikov E. Z. (USSR). Publ. 30.03.93. Bulletin No. 12. (In Russ.)
9. Skryabin V. A., Pshenichnyy O. F. [The design of the microcutting process in treating details by a close-settled layer of unsupported abrasive]. In: *Engineering: Proceedings*. Minsk: Vysheyshaya Shkola Publ.; 1988; 13:33–37. (In Russ.)
10. Skryabin V. A. [*Bases of Process of Submicrometre at Treatment of Details an Unsupported Abrasive: A Monograph*]. Penza: PVAIU Publ.; 1992. 120 p. (In Russ.)
11. Skryabin V. A. [Productivity of the treatment of details by statically close-settled layer of abrasive flour grain]. *Izvestiya vuzov: Mashinostroeniye* = Higher Education Institutions Bulletin: Engineering. 1994; 4-6:128–130. (In Russ.)
12. Skryabin V. A., Skhirtladze A. G. *Technological Providing of Quality of Treatment of Figurine Details Close-Settled Fine Environment: A monograph*. Staryy Oskol: Thin Knowledge-Based Technologies Publ.; 2015. 240 p. (In Russ.)



13. Skryabin V. A., Skhirtladze A. G., Rybakov Yu. V. A new method of finishing parts with free fine media. *Tekhnologiya metallov* = Metal Technology. 2003; 2:16–17. (In Russ.)

14. Skryabin V. A., Svechnikova G. I. The experimental studies of the finish abrasive treatment of parts with different profiles. *Mashinostroitel* = Mechanician. 2011; 4:18–22. Available at: <https://rucont.ru/efd/473243> (In Russ.)

15. Patent 1803308 (Russian Federation), MKI: B24B 31/104. Method of processing of details / Skryabin V. A. Publ. 23.03.93. Bulletin № 11. (In Russ.)

Received 20.09.2017; revised 02.04.2018; published online 28.12.2018

About author:

Vladimir A. Skryabin, Professor, Mechanical Engineering Chair, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440000, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: R-2385-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru

The author has read and approved the final version of the paper.