



Работоспособность конструкции установки для финишной обработки незакрепленным абразивом среднегабаритных деталей сложного профиля

В. А. Скрябин*, И. К. Крамченинов

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
(г. Пенза, Россия)

*vs_51@list.ru

Введение. 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 специальных устройствах для полирования. Обработка этих поверхностей на шлифовальной машинке жестким шлифовальным кругом занимает много времени и не может полностью обеспечить контакт со всеми лопатками колеса вследствие их взаимного близкого расположения, малого углового шага и труднодоступности.

Материалы и методы. Основными режимными параметрами процесса обработки вышеуказанных деталей являются давление незакрепленного абразива на рабочие поверхности лопаток и скорость вращения детали на оправке установки (скорость резания). Поскольку колесо турбины достаточно габаритное по размерным характеристикам, а его масса достигает 6 кг, оно должно быть прочно закреплено на специальной оправке с целью минимизации вибраций детали в процессе обработки, уменьшения жесткости шпинделя и обеспечения заданных значений производительности и качественных характеристик обрабатываемых поверхностей лопаток. Кроме того, ввиду действия на рабочую поверхность режимных параметров деталь испытывает значительные статические и динамические нагрузки, действие которых может привести к недопустимому прогибу оправки для закрепления детали, неравномерности обработки ее сложных поверхностей и недостижению заданных параметров качества поверхностного слоя.

Результаты исследования. При проектировании установки оправка, на которую крепится деталь, и конструкция детали в плане определения действующих нагрузок и прогибов рассчитывались с помощью программного продукта SolidWorks 2016 с целью сравнения вышеуказанных параметров с допустимыми значениями, а также для калькуляции исключений потери жесткости шпиндельного узла установки.

Обсуждение и заключения. Выполненные расчеты показали, что при полировании поверхностей деталей сложного профиля нагрузки и прогибы на деталь и оправку находятся в пределах допустимых значений, что обеспечивает стабильную качественную и производительную обработку сложных поверхностей.

Ключевые слова: теоретическое исследование, сложная поверхность детали, незакрепленные абразивные частицы, производительность, качественный показатель, проектирование оборудования, автоматизация конструкторских расчетов

Для цитирования: Скрябин В. А., Крамченинов И. К. Работоспособность конструкции установки для финишной обработки незакрепленным абразивом среднегабаритных деталей сложного профиля // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 4. С. 607–619. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201704.607-619

Installation Design Capacity for Finish Treatment of Complex Profile Medium Size Parts by Unsupported Abrasive

V. A. Skryabin*, I. K. Kramcheninov

Penza State University (Penza, Russia)

*vs_51@list.ru

Introduction. The paper describes solutions of the problem raised during treating the turbine wheel of a turbocharger. The treatment of a complex surface with a hard grinding wheel requires a lot of time. This method does not provide the required quality because of the inaccessibility of some parts of the turbine blades. The problem is solved by polishing with loose abrasive grains. The abrasive medium is compressed with compressed air through a special device.

Materials and Methods. The SolidWorks 2016 software was used to design the tool. The design of the part for determining actual loads and deflections was calculated taking into account the comparison of the operating parameters with the permissible values.

Results. The main parameters of the part treatment are the pressure of the loose abrasive on the working surfaces of the blades and the speed of rotation of the part on the mandrel of the installation (cutting speed). During treating, the part experiences significant static and dynamic loads. The tension can lead to inadmissible deflection of the mandrel to secure the part, uneven treatment of its complex surfaces and defects. The performed calculations showed that in polishing the surfaces of parts of a complex, load profile and deflections on the workpiece and the mandrel are within the permissible values.

Discussion and Conclusions. The presented method provides stable qualitative and productive treatment of the complex surfaces. The findings from this study contribute to the current technology of metal processing.

Keywords: theoretical study, complex detail surface, loose abrasive particles, capacity, quality indicator, equipment design, automation of design calculations

For citation: Skryabin V. A., Kramcheninov I. K. Installation Design Capacity for Finish Treatment of Complex Profile Medium Size Parts by Unsupported Abrasive. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 27(4):607–619. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201704.607-619

Введение

Финишная обработка среднегабаритных деталей из труднообрабатываемых литейных сплавов марки ЖСЗДК твердостью 40–45 HRC с близкорасположенными сложными поверхностями второго порядка (типа лопаток турбинных колес и вращающихся направляющих аппаратов турбокомпрессоров дизельных агрегатов) устройствами с обычными шлифовальными кругами всегда имела достаточно проблемный характер вследствие низкой производительности и невозможности стабильного обеспечения заданной шероховатости по всей площади сложной поверхности детали на многих предприятиях среднего и тяжелого машиностроения.

Обзор литературы

В методах финишной обработки различных деталей существует определенный класс деталей, которые трудно, а иногда и невозможно обработать традиционными методами обычного шлифования жесткими абразивными кругами.

Решением этого сложного вопроса явилось создание метода обработки вышеуказанных деталей незакрепленным абразивным материалом, статически уплотненным сжатым воздухом через эластичную оболочку.

Теоретической и экспериментальной основой создания данного метода явился ряд статей [1–6], которые позволили разработать теоретические основы вышеуказанного метода финишной обработки и создать практиче-



ские разработки различных установок, предназначенных для обработки сложнопрофильных и плоских деталей, а также создать научно обоснованные практические рекомендации по определению рациональных режимов и условий обработки с целью достижения заданной производительности и качества процесса финишной абразивной обработки.

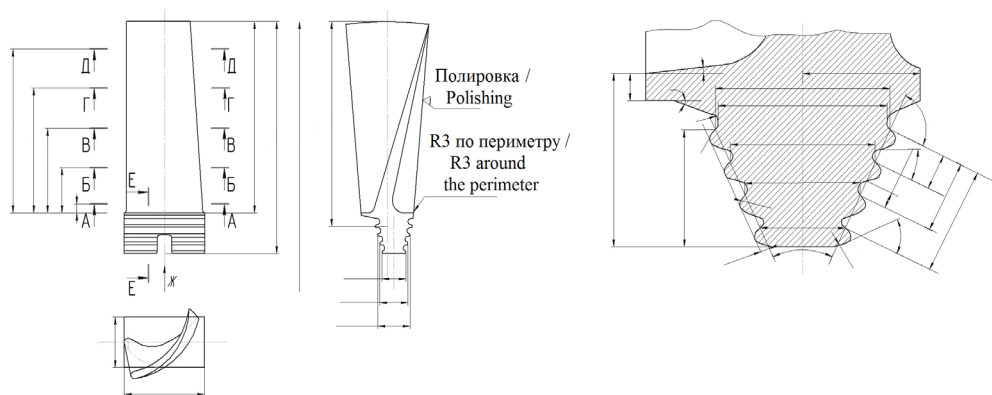
Материалы и методы

Высокая эффективность финишной обработки вышеуказанных деталей (рис. 1–2) может быть достигнута незакрепленным абразивным материалом¹⁻² [7]. Это осуществляется уплотнением абразивной массы путем давления на нее гибкой оболочки контейнера под действием сжатого воздуха в специальной установке³ [8–9].



Р и с. 1. Опытный образец детали (колесо турбины), использованный при проведении исследований

F i g. 1. Prototype parts (turbine wheel) used in the study



Р и с. 2. Чертеж профиля турбинной лопатки

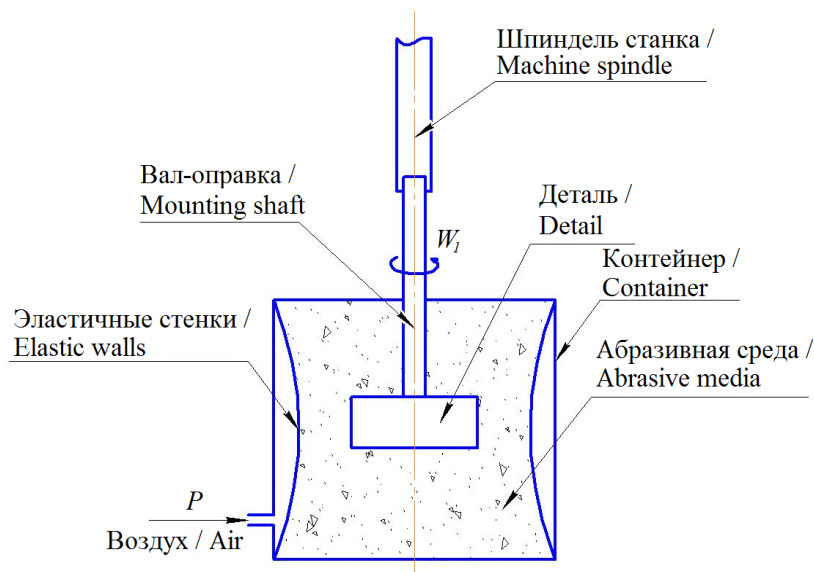
F i g. 2. The drawing of the turbine blade profile

¹ **Скрябин В. А.** Основы процесса субмикрорезания при обработке деталей незакрепленным абразивом : монография. Пенза : Изд-во ПБАИУ, 1992. 120 с.

² **Скрябин В. А., Схиртладзе А. Г.** Технологическое обеспечение качества обработки сложнопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными средами : монография. Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2015. 240 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25306901>

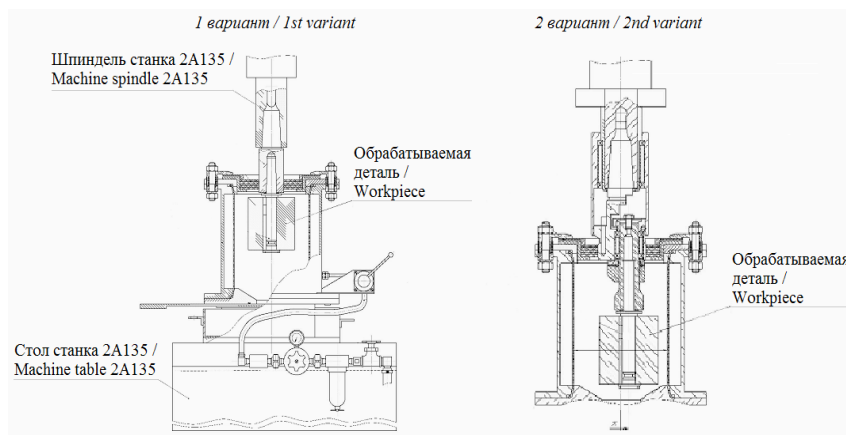
³ Патент 1803308 (РФ), МКИ: B24В 31/104. Способ обработки деталей / В. А. Скрябин. Оpubл. 23.03.93, Бюл. №11.

Конструкция установки (рис. 3) и формы обрабатываемой сложной поверхности детали.



Р и с. 3. Схема установки для обработки деталей незакрепленным уплотненным абразивом
F i g. 3. Drawing of the profile of the turbine blade

Исследования процесса обработки лопастей колеса турбины, осуществля- лись на экспериментальной установке, общий вид которой показан на рис. 4.



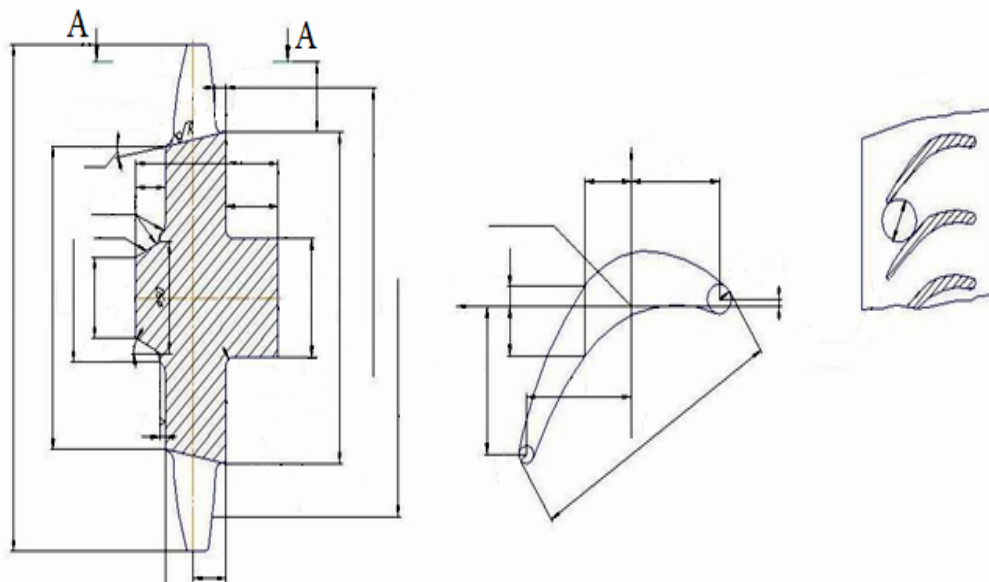
Р и с. 4. Общий вид вариантов экспериментальной установки
F i g. 4. General view of the experimental setup variants



Установка зафиксирована на столе вертикально-сверлильного или радиально-сверлильного станков и соединена со шпинделем станков. В первом варианте оправка 17 на валу ротора 12 шпинделя расположена без эксцентриситета, а во втором – с небольшим эксцентриситетом E (5–10 мм) относительно оси вала ротора 15. Небольшой эксцентриситет связан с достаточно

большими габаритными размерами детали и массой до 10 кг.

Превышение значений эксцентриситета $> 5\text{--}10$ мм относительно принятого экспериментальным путем в процессе проектирования установки приводит к увеличению вибраций обрабатываемой детали (рис. 5), ухудшает производительность обработки и качество поверхности детали.



Р и с. 5. Опытный образец детали, использованный при проведении исследований

F i g. 5. The prototype of the parts used in the study

Работа такого устройства осуществляется следующим образом. Обрабатываемую деталь с радиусом R закрепляют на оправке 17 первого варианта исполнения установки (рис. 5), которая устанавливается на вал ротора 12. Перемещение оси оправки относительно оси ротора 15 (второй вариант конструктивного исполнения установки) обеспечивается шарнирным поводком с шариками. Ротор помещают в контейнер 1 с гибкими стенками, заполненный абразивной средой под давлением сжатого воздуха, и сообщают ему вращения с угловой скоростью $\omega_1 = V / (E + R)$ для установки по второму варианту конструктивного испол-

нения и $\omega_2 = V / R$ – по первому варианту (V – линейная скорость резания).

Для подачи сжатого воздуха на гибкую оболочку была разработана пневматическая система 2 (рис. 4). Во время обработки установка закрывается крышкой с уплотнением 5 для исключения выхода абразивной массы из установки, что связано с уменьшением давления зерен на обрабатываемую поверхность детали. Необходимо отметить, что для обработки наружных и внутренних поверхностей лопаток колеса турбины выполнялся реверс шпинделя станка приблизительно через 5–8 мин обработки одной стороны поверхности лопатки.

Результаты исследования

Отличительным признаком при обработке колеса турбины на установке (рис. 6) является наличие сложных поверхностей и поднутрений. Обработка шлифовальными кругами с помощью ручной шлифовальной машинки сопровождается значительными времен-

ными затратами. Для получения требуемой шероховатости поверхности лопаток ротора необходимо стабильное уплотнение абразива и жесткая фиксация обрабатываемой детали на оправке ротора, обеспечивающая равномерное давление незакрепленного абразива на всю поверхность лопаток.



Р и с. 6. Фотография экспериментальной установки
F i g. 6. The photograph of the experimental installation

Одним из главных моментов при проектировании установки являются расчеты на прочность и расчеты прогибов (деформаций) вала – оправки, на которой закрепляется обрабатываемая деталь. Поскольку данные расчеты довольно трудоемкие и не визуализируют картину напряженно-деформированного состояния конструкции установки, их целесообразно выполнить с помощью автоматизированной программы кон-

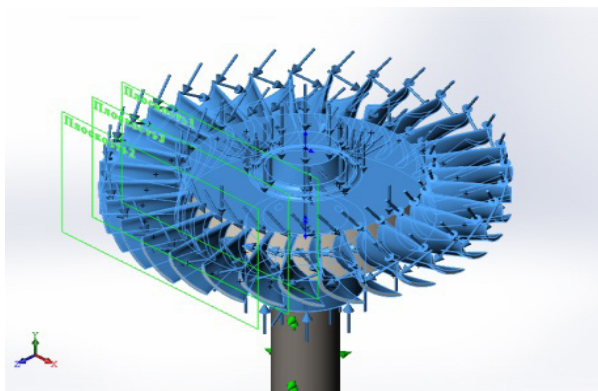
структорских расчетов SolidWorks. Для расчетов на статическую прочность деталей в программе SolidWorks служит модуль SolidWorks Simulation Xpress. При проектировании устройства для обработки колеса турбины было использовано программное обеспечение SolidWorks 2016 для симуляции нагрузки на вал-оправку, которое позволяет обеспечить получение необходимых размеров установки для финишной обработки.

Процессы и машины агроинженерных систем



Результаты исследования отображены в отчете, сформированном по окончании симуляции нагрузок на устройство с помощью программного продукта SolidWorks 2016. При симу-

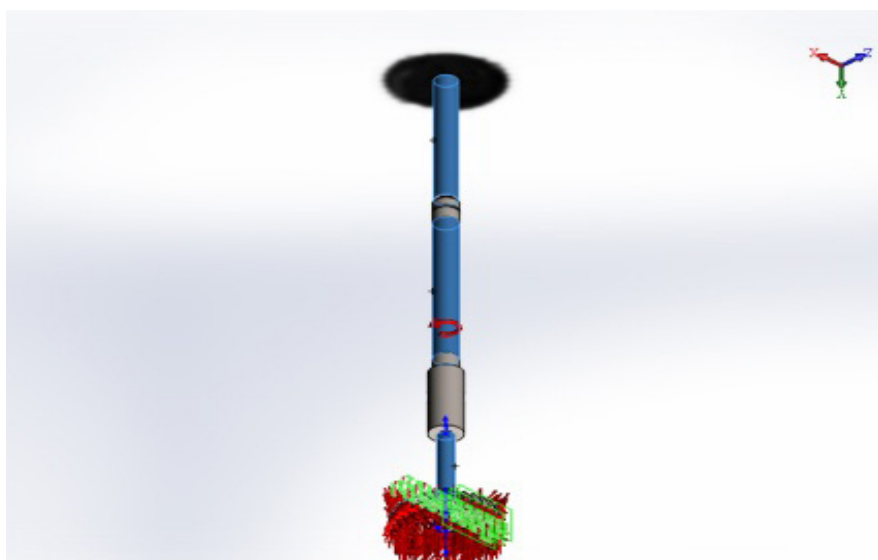
ляции в программном продукте исследования нагрузок на все поверхности детали, обрабатываемой в устройстве (см. рис. 3), к абразивной среде было приложено давление 0,2 МПа (рис. 7).



Р и с. 7. Симуляция давления абразивной среды на ротор установки
F i g. 7. Simulation of the abrasive medium pressure on the rotor

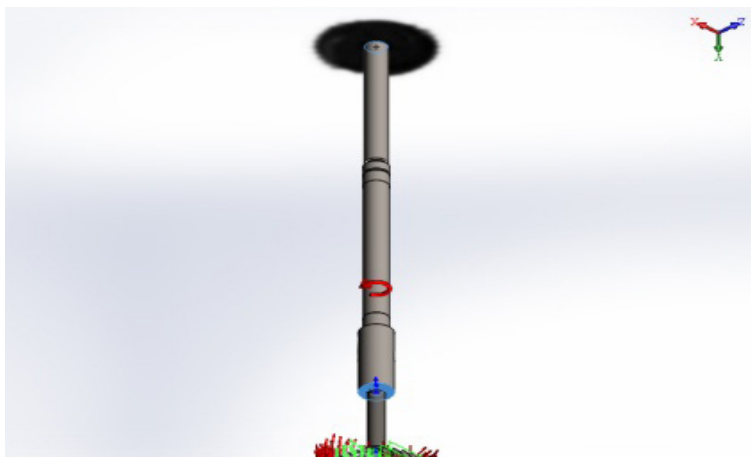
Вал радиально- или вертикально-сверлильного станка закреплен на шар-

нирных опорах, симулирующих подшипниковые опоры установки (рис. 8).



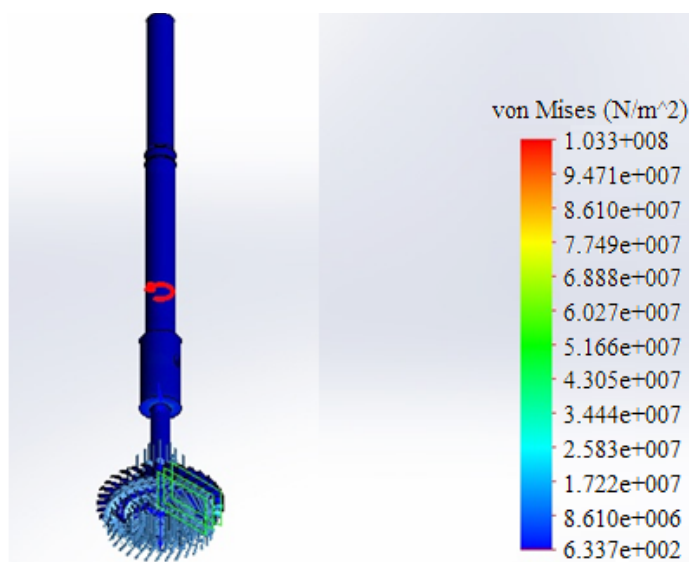
Р и с. 8. Поверхности, закрепленные на шарнирных опорах
F i g. 8. Surfaces mounted on hinged supports

К валу была приложена сила, передающая вращение к оправке, а затем от оправки к ротору (рис. 9). Угловая скорость вращения $\leq 5 \text{ рад/с}^4$ [10].



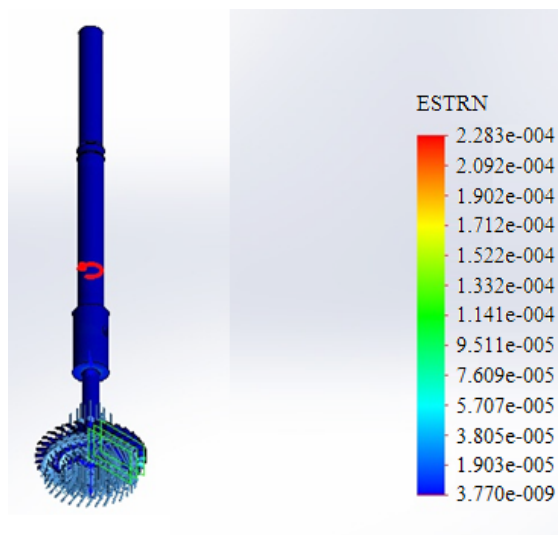
Р и с. 9. Вращение вала ротора с деталью
F i g. 9. The rotation of the rotor shaft with the detail

По результатам симуляции нагрузок при напряжено-деформированном состоянии получаем статико-динамический анализ деталей в конструкции и самой конструкции на прочность (рис. 10–11).



Р и с. 10. Результаты исследования напряжений в конструкции
F i g. 10. The results of researching the tension in the structure

⁴ А. с. 1579740 СССР, МКИ В24В 31/08. Способ абразивной обработки деталей / А. Н. Мартынов, В. А. Скрябин, В. М. Федосеев. Оpubл. 23.07.90, Бюл. № 27.



Р и с. 11. Результаты исследования деформаций в конструкции
 F i g. 11. The research results of the deformations in the structure

Результаты исследований статической прочности и деформаций элементов установки были сведены в соответствующие таблицы.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Статический анализ, результаты напряжений

Static analysis, tension results

Имя / Name	Тип / Type	Мин / Minimum	Макс / Maximum
Напряжение 1 / Tension 1	VON: Напряжение / Tension Von Mises	633.659 N/m ² Узел: 22298 / Unit: 22298	1.03317e+008 N/m ² Узел: 599 / Unit: 599
<p>Имя модели: Сборка 1 / Model name: Build 1 Название исследования: Статистический анализ 1 (-По умолчанию-) / Title of the study: Statistical analysis 1 (-Output-) Тип эпоры: Статистический анализ узловое напряжение (Напряжение 1) / Diagram type: Statistical analysis nodal voltage (Voltage 1) Шкала деформации: 1 / Deformation scale: 1</p> <p>Сборка 1 - Статический анализ 1 - Напряжение - Напряжение 1 / Build 1 - Static Analysis 1 - Tension - Tension 1</p>			

Статический анализ, результаты перемещений

Static analysis, displacement results

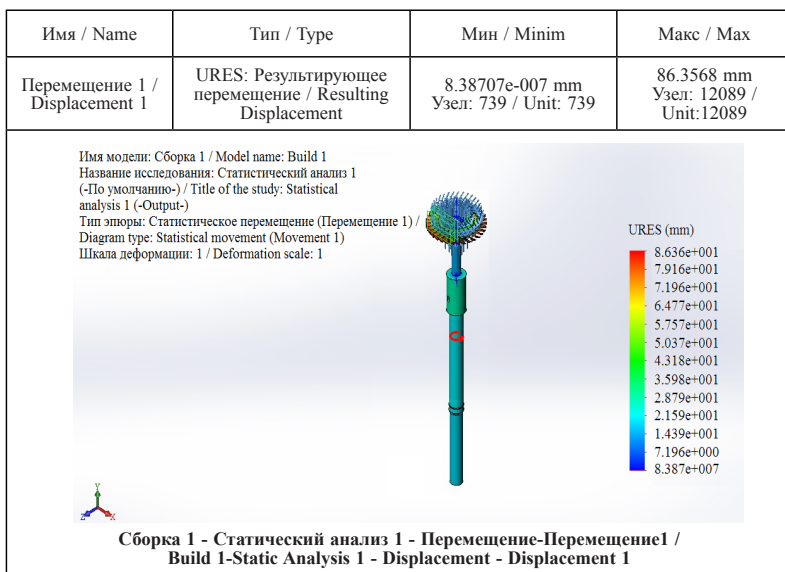
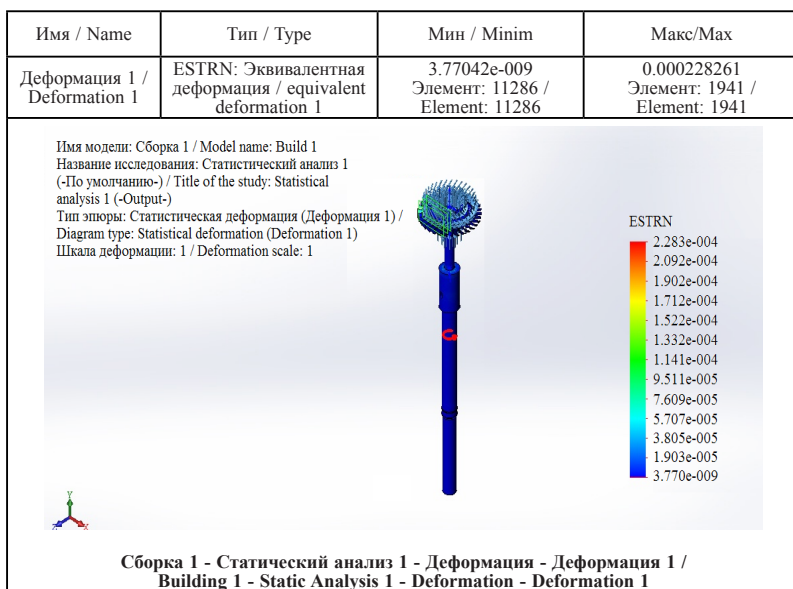


Таблица 3

Table 3

Статический анализ, результаты деформации

Static analysis, deformation results





Результаты исследований статической прочности и деформаций элементов установки были сведены в соответствующие таблицы.

Обсуждение и заключения

Результаты исследований показали, что в условиях напряженно-деформированного состояния при статико-динамической нагрузке детали конструкции установки имеют достаточную прочность, минимальный прогиб, способны обеспечить заданное качество обработки сложнопрофильных деталей и надежно функционировать в течение заданного срока эксплуатации установки для финишной обработки.

Разработанная экспериментальная установка позволяет обрабатывать с заданной производительностью колеса турбин из жаропрочного труднообрабатываемого литейного сплава ЖСЗДК с твердостью 40–45 HRC и исходной шероховатостью поверхности $R_a = 2,5$ мкм. Обрабатывающей средой является абразив 63C50 (карбид

кремния зеленый) при давлении сжатого воздуха на эластичную оболочку камеры $P = 0,2$ МПа. В связи с обеспечением высокой режущей способности рабочей среды ее объемную влажность рекомендуется назначать в диапазоне 20–22 % [10]. В качестве смазочно-охлаждающих технологических средств очень хорошие результаты показали рабочие жидкости Аквол-2 (2–10%-ный водный раствор), Аквол-10М, Аквол-14 (3–12%-ный водный раствор). Конечная шероховатость после обработки изменялась в диапазоне $R_a = 0,24–0,40$ мкм. Машинное время обработки сложных поверхностей деталей на установке незакрепленными абразивными зернами под давлением сжатого воздуха по сравнению с обработкой шлифовальной машинкой с жестко закрепленным на ней шлифовальным кругом снизилось в 15–25 раз, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности предлагаемого способа полирования деталей уплотненной обрабатывающей средой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Скрябин В. А., Пшеничный О. Ф.** Моделирование процесса микрорезания при обработке деталей уплотненным слоем незакрепленного абразива // *Машиностроение* : Респ. межвед. сб. 1988. Вып. 13. С. 33–37.
2. **Скрябин В. А.** Производительность процесса обработки деталей статически уплотненным слоем абразивного микропорошка // *Известия вузов (Сер. «Машиностроение»)*. 1994. № 4-6. С. 128–130.
3. **Пшеничный О. Ф., Скрябин В. А.** Финишная обработка спеченных деталей в уплотненной абразивной среде // *Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента* : межвуз. сб. науч. тр. 1987. Вып. 15. С. 59–63.
4. **Скрябин В. А.** Исследование влияния технологических факторов и условий финишной абразивной обработки на производительность обрабатываемых поверхностей деталей сложного профиля // *Машиностроитель*. 2011. № 4. С. 16–23. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22965810>
5. **Скрябин В. А., Схиртладзе А. Г., Рыбаков Ю. В.** Камерный способ обработки сложнопрофильных деталей уплотненным мелкодисперсным абразивом // *Технология металлов*. 2003. № 1. С. 19–24. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20935710>
6. **Скрябин В. А.** Исследование влияния технологических факторов и условий финишной абразивной обработки на шероховатость обрабатываемых поверхностей деталей с различным профилем // *Машиностроитель*. 2011. № 3. С. 18–22. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22965810>
7. **Мартынов А. Н.** Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. Саратов : Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 1981. 212 с.

8. Скрыбин В. А., Схиртладзе А. Г., Рыбаков Ю. В. Новый метод финишной обработки деталей свободными мелкодисперсными средами // Технология металлов. 2003. № 2. С. 16–17. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=219640423>

9. Скрыбин В. А., Свечникова Г. И. Экспериментальные исследования производительности финишной абразивной обработки деталей с различным профилем // Машиностроитель. 2011. № 4. С. 18–22. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22985053>

10. Скрыбин В. А. Особенности обработки сложногопрофильных деталей уплотненными мелкодисперсными абразивными средами // Вестник Мордовского университета. 2015. Т. 25, № 4. С. 72–89. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23338433>

Поступила 19.05.2017; принята к публикации 21.09.2017; опубликована онлайн 19.12.2017

Об авторах:

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

Крамченинов Илья Константинович, магистр кафедры технологии машиностроения, факультет машиностроения и транспорта, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (440000, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), **ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3082-8135>**, kram4eninov@mail.ru

Вклад соавторов:

В. А. Скрыбин: научное руководство, анализ и доработка текста, редактирование текста; И. К. Крамченинов: подготовка начального текста с последующей доработкой, анализ литературных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Skryabin V. A., Pshenichny O. F. [The design of the microcutting process in treating details by a close-settled layer of unsupported abrasive]. In: Engineering: Proceedings. Minsk; 1988; 13:33–37. (In Russ.)
2. Skryabin V. A. [Productivity of the treatment of details by statically close-settled layer of abrasive flour grain]. *Izvestiya vuzov: Mashinostroeniye* = Bulletin of Institutions of Higher Education: Engineering. 1994; 4-6:128–130 (In Russ.)
3. Pshenichny O. F., Skryabin V. A. Finishing of sintered parts in a compacted abrasive medium. In: *Almaznaya i abrazivnaya obrabotka detaley mashin i instrumenta: Sbornik* = Diamond and abrasive processing of machine and tool parts: Proceedings. 1987; 15:59–63. (In Russ.)
4. Skryabin V. A. [The study of the influence of technological factors and the conditions of finish abrasive treatment on the productivity of the machined surfaces of complex profile parts]. *Mashinostroitel* = Mechanician. 2011; 4:16–23. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22965810> (In Russ.)
5. Skryabin V. A., Skhirtladze A. G., Rybakov Yu. V. [The chamber method for treating complex profile parts by compacted fine-dispersed abrasive]. *Tekhnologiya metallov* = Metal Technology. 2003; 1:19–24. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20935710> (In Russ.)
6. Skryabin V. A. [The study of the influence of technological factors and conditions of finish abrasive treatment on the roughness of the machined surfaces of parts with different profiles]. *Mashinostroitel* = Mechanician. 2011; 3:18–22. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22965810> (In Russ.)
7. Martynov A. N. Fundamentals of the method of treating details with a free abrasive compacted by inertial forces. Saratov: Saratov University Publ., 1981. (In Russ.)



8. 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. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=219640423> (In Russ.)
9. 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: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22985053> (In Russ.)
10. 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. (In Russ.)

Submitted 19.05.2017; revised 21.09.2017; published online 19.12.2017

About the authors:

Vladimir A. Skryabin, Professor of Mechanical Engineering Chair, Mechanical Engineering and Transport Faculty, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440000, Russia), Dr.Sci. (Engineering), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, vs_51@list.ru

Ilya K. Kramcheninov, Master's Degree Student, Mechanical Engineering Chair, Mechanical Engineering and Transport Faculty, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440000, Russia), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-3082-8135>, kram4eninov@mail.ru

All authors have read and approved the final version of the manuscript.