

## МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.623-640>EDN: <https://elibrary.ru/bdonzc>

УДК / UDK 621.92

*Оригинальная статья / Original article*

### Влияние технологических факторов центробежно-планетарной обработки на шероховатость внутренних каналов мелкоразмерных деталей

А. Е. Зверовщиков<sup>1</sup>, А. В. Стешкин<sup>2</sup>, П. А. Гурин<sup>1</sup>✉,  
Н. А. Миронычев<sup>1</sup>, Е. В. Зотов<sup>1</sup>, В. А. Скрыбин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет,

г. Пенза, Российская Федерация

<sup>2</sup> Федеральный научно-производственный центр

«Производственное объединение “Старт” им. М. В. Проценко»,

г. Заречный, Российская Федерация

✉ [sbgurin\\_pavel@list.ru](mailto:sbgurin_pavel@list.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Обработка мелкоразмерных деталей с внутренними каналами является сложной технологической задачей, которая решается с применением дисперсных шлифовальных материалов. Требуемого качества поверхностей внутренних каналов можно достичь при использовании технологии центробежно-планетарной обработки с корректным выбором технологических режимов, для которой необходимо разработать теоретическую базу.

**Цель исследования.** Теоретически обосновать возможности центробежно-планетарной обработки поверхностей мелкоразмерных каналов на основе определения параметров контактного взаимодействия при скользящем ударе рабочего тела.

**Материалы и методы.** Для определения диапазона технологических характеристик оборудования использовалась разработанная программа «Канал», исходные данные для которой были рассчитаны при помощи компьютерного моделирования контактного взаимодействия в программном пакете ANSYS WORKBENCH. Экспериментальные исследования осуществлялись на установке Д7Н.650.00.00. Использовались образцы мелкоразмерных деталей из латуни ДКРНТ 30 НД Л63 ГОСТ 2060-2006 с покрытием из гальванического серебра. В качестве рабочих тел применялась дробь CHRONITAL фирмы Vulkan Inox GmbH (Германия).

**Результаты исследования.** Анализ результатов расчетов в программе ANSYS позволил определить диапазон скоростей рабочих тел, при которых деформации основы детали остаются в пределах нормы. Рассчитанный диапазон скоростей послужил исходными данными для расчета технологических факторов обработки в программе «Канал», благодаря чему получены необходимые параметры для теоретического расчета шероховатости поверхности. Для определения экспериментальных значений шероховатости проведены исследования, позволившие установить эмпирическую зависимость. Показана хорошая сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований.

© Зверовщиков А. Е., Стешкин А. В., Гурин П. А., Миронычев Н. А., Зотов Е. В., Скрыбин В. А., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Обсуждение и заключение.** Для технологической подготовки производства теоретически описаны и экспериментально подтверждены взаимосвязи параметров шероховатости обрабатываемой внутренней поверхности с покрытием и технологических режимов центробежно-планетарной обработки. На основе результатов исследований разработан способ обработки внутренних каналов деталей с поверхностями сложного профиля, направленный на повышение эффективности их изготовления с обеспечением требуемого качества поверхностей. Предлагаемая методика является основой для проведения технологической подготовки производства деталей с внутренними поверхностями, имеющими гальваническое покрытие из серебра. Дальнейшие исследования в этой области предполагают расширение гаммы материалов покрытий, твердость которых по-разному соотносится с твердостью основного материала.

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, мелкоразмерные детали, гальваническое покрытие, центробежно-планетарная обработка, внутренний канал детали, моделирование контактного взаимодействия, напряженно-деформированное состояние, скорость рабочих тел, частота вращения, передаточное отношение, контактное взаимодействие

**Финансирование:** работа выполнена в рамках проекта «Научные принципы процессов формирования гетерогенных структур методами физико-химического диспергирования» (№ соглашения 0748-2020-0013) в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 2020 г.

**Благодарности:** авторы выражают признательность анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Зверовщиков А.Е., Стешкин А.В., Гурин П.А., Миронычев Н.А., Зотов Е.В., Скрябин В.А. Влияние технологических факторов центробежно-планетарной обработки на шероховатость внутренних каналов мелкоразмерных деталей. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):623–640. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.623-640>

## The Influence of Technological Factors of Centrifugal Planetary Treating the Roughness of the Internal Channels of Small-Sized Parts

A. E. Zverovshchikov<sup>a</sup>, A. V. Steshkin<sup>b</sup>, P. A. Gurin<sup>a</sup>✉,  
N. A. Mironychev<sup>a</sup>, E. V. Zotov<sup>a</sup>, V. A. Skryabin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Penza State University,  
Penza, Russian Federation

<sup>b</sup> Production Association “Start” named after M. V. Protsenko,  
Zarechny, Russian Federation

✉ [sbgurin\\_pavel@list.ru](mailto:sbgurin_pavel@list.ru)

### Abstract

**Introduction.** Treating small-sized parts having internal channels is a complex technological task that can be solved using dispersed grinding materials. The required surface quality of the internal channels can be achieved by using centrifugal planetary treatment technology with the correct choice of technological modes. It is necessary to develop a theoretical framework for this technology.

**Aim of the Study.** The study is aimed at substantiating theoretically the possibilities of centrifugal planetary surface treatment of small-sized channels based on the determination of contact interaction parameters upon a sliding impact of the working material.

**Materials and Methods.** To determine the range of equipment technological characteristics, there was used the developed program “Channel”, the initial data for which were calculated using computer simulation of contact interaction in the software package ANSYS WORKBENCH. Experimental studies were carried out on the installation D7H.650.00.00. There were used the samples of small-sized brass parts DKRNT 30 ND L63 GOST 2060-2006 with silver electroplated coating. CHRONITAL – CAST Stainless Steel Shot by the firm Vulkan Inox GmbH (Germany) was used as working material.

**Results.** The calculation results was analyzed in the program ANSYS that made it possible to determine the range of working material speed at which deformation of the part base was within the normal range. The calculated speed range was used as the initial data for calculating the technological factors of processing in the program “Channel” that provided the necessary data for the theoretical calculation of surface roughness. To determine the experimental roughness values, there were carried out the studies, which allowed us to found an empirical relationship. There has been shown the convergence between the results of theoretical and experimental studies.

**Discussion and Conclusion.** For the technological preparation of manufacturing, there have been theoretically described and experimentally confirmed the relationships between the roughness parameters of the coated inner surface under treating and the technological modes of centrifugal planetary treatment. Based on the study results, there has been developed a method for treating internal channels of parts with complex profile surfaces. This method is aimed at increasing their manufacturing efficiency while ensuring the required surface quality. The proposed method is the basis for the technological preparation of manufacturing parts with internal surfaces having a silver electroplated coating. Further research in this area suggests expanding the range of coating materials, the hardness of which correlates differently with the hardness of the base material.

**Keywords:** surface roughness, small-sized parts, electroplating, centrifugal planetary treatment, internal channel of the part, modeling of contact interaction, stress-strain state, speed of working material, rotational speed, gear ratio, contact interaction

**Funding:** the work was carried out within the framework of the project “Scientific principles of the processes of formation of heterogeneous structures by methods of physico-chemical dispersion” (Agreement No. 0748-2020-0013) within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, 2020

**Acknowledgements:** the authors express their gratitude to anonymous reviewers, whose objective comments contributed to improving the quality of the article.

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**For citation:** Zverovshchikov A.E., Steshkin A.V., Gurin P.A., Mironychev N.A., Zotov E.V., Skryabin V.A. The Influence of Technological Factors of Centrifugal Planetary Treating the Roughness of the Internal Channels of Small-Sized Parts. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):623–640. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.623-640>

## ВВЕДЕНИЕ

Мелкогабаритные детали с внутренними поверхностями каналов переменного сечения находят широкое применение в машиностроении, приборостроении и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Качество таких поверхностей, включая их шероховатость и равномерность нанесенных покрытий, является критически важным параметром, определяющим надежность и долговечность деталей. Однако достижение требуемого уровня качества в условиях сложной геометрии и малых размеров каналов сопряжено с рядом технологических проблем<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкогабаритных деталях при центробежной обработке: дисс. ... канд. техн. наук. Пенза; 2022. 212 с.

Одной из наиболее сложных задач является обработка нецилиндрических внутренних каналов, покрытых тонкими функциональными покрытиями, которые требуют минимальных припусков на обработку, что ограничивает использование традиционных методов отделки. Это особенно важно в условиях, когда необходимо обеспечить высокую точность и низкую себестоимость обработки. Применение традиционных методов обработки, таких как шлифование или полирование, оказывается затруднительным из-за недостаточной доступности инструмента и риска повреждения покрытий. В связи с этим актуальность поиска новых подходов к обработке внутренних каналов мелкоразмерных деталей продолжает расти.

Среди перспективных методов отделочной обработки особое место занимает центробежно-планетарная обработка, основанная на использовании абразивных и деформирующих рабочих сред<sup>2</sup> [1]. В процессе такой обработки инерционные силы обеспечивают эффективное формообразование поверхности, позволяя снизить трудоемкость отделочных операций и повысить стабильность качества. Однако выбор оптимальных технологических параметров обработки остается открытым вопросом, требующим теоретического и экспериментального подхода [2].

Настоящая работа посвящена изучению технологических факторов (частота вращения водила, частота вращения контейнеров, степень заполнения контейнеров, время обработки), влияющих на качество поверхности внутренних каналов мелкоразмерных деталей, обработанных на центробежно-планетарной установке. В частности, при центробежной обработке следует обеспечить решение следующих технологических задач<sup>3</sup>:

1) напряжения в зоне контакта при воздействии на поверхность рабочими телами (шарами) достаточны для пластической деформации выступов микронеровностей покрытия из серебра<sup>4</sup>;

2) напряжения в материале латунной подложки (основы) меньше значения ее предела текучести [3] (менее 150 МПа);

3) величина пластической деформации материала покрытия не превышает 75 % высоты неровностей поверхности по параметру  $R_{\max}$ , т. е. не более 3,4 мкм.

Выполнения этих условий можно достигнуть путем управления скоростями рабочих тел в момент контакта с деталью, что теоретически определено и проанализировано в САЕ-среде с помощью разработанной в ходе исследования программы «Канал».

После этого необходимо провести расчеты теоретических (прогнозируемых) значений шероховатости поверхности, получаемых при обработке деталей с ранее определенными значениями основных факторов, и подтвердить эти расчеты экспериментально.

Цель исследования – теоретическое обоснование возможности подготовки поверхностей мелкоразмерных каналов сечением менее 5 мм методом центробежно-

<sup>2</sup> Зверовщиков А.Е. Многофункциональная центробежно-планетарная обработка: моногр. М.: ИНФРА-М; 2013. 175 с.

<sup>3</sup> Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.

<sup>4</sup> Там же.

планетарной обработки на основе определения параметров контактного взаимодействия при скользящем ударе рабочего тела.

Задачи исследования: выработка критерия допустимости деформационного воздействия на поверхности с покрытием; раскрытие взаимосвязи между контактным воздействием рабочего тела на обрабатываемую поверхность и режимами центробежно-планетарного движения заготовки.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для обеспечения требуемых значений шероховатости ( $Ra = 0,67$  мкм) внутренних поверхностей малогабаритных деталей известны разные методы обработки, среди которых можно выделить электроплазменную обработку, абразивную обработку эластичным инструментом, химическое и электрохимическое полирование, абразивную и деформационную обработку свободным материалом. Наличие покрытия на подобных поверхностях создает дополнительные сложности, которые требуют от технолога решения задач, связанных с меньшей прочностью материала адгезионной зоны покрытия (в отличие от однородного материала)<sup>5</sup>.

Используют известные методы обработки отверстий деформируемым инструментом, который позволяет повторять форму поверхности [4; 5]. Проблема выбора подобных методов для решения поставленной задачи заключается в невозможности обработки малоразмерных отверстий.

Абразивную обработку с использованием цилиндрического гибкого режущего инструмента из проволоки, состоящей из одной или нескольких более мелких проволок, сплетенных между собой, с нанесенным абразивным слоем также используют для обработки мелких фасонных поверхностей [6]. Однако подобный инструмент имеет невысокую проникающую способность и не позволяет произвести обработку сопряжений поверхностей.

Наличие покрытия из медьсодержащих и алюминиевых сплавов или серебра не позволяет использовать и электроплазменную обработку [7]. Равномерность обработки будет значительно зависеть от структурной и химической неравномерности материала.

Заменить механическое полирование можно химическим и электрохимическим полированием различными растворами, содержащими активные добавки<sup>6</sup>. Основное преимущество электрохимического полирования [8] состоит в возможности обеспечения товарного вида и приобретаемого блеска за счет достижения шероховатости поверхности до  $Ra 0,1$  мкм. Однако неоднозначное формирование качества и структуры поверхностного слоя, а также риск появления коррозии указывают на недостатки химического и электрохимического полирования [9].

Внутренние полости деталей можно обрабатывать свободным инструментом (абразивным или неабразивным материалом), который совместно с технологической жидкостью перемещается в канале под действием приложенных сил. Часто используется вибрационная обработка отверстий деталей деформирующими или

<sup>5</sup> Зверовщиков А.Е. Многофункциональная центробежно-планетарная обработка.

<sup>6</sup> Липкин Я.Н. Химическое полирование металлов. М.: Машиностроение; 1988. 111 с.

абразивными средами [10; 11]. Основная сложность использования подобных методов заключается в невозможности достичь равномерной обработки по контуру мелкогабаритного отверстия сложной конфигурации.

Внутренние поверхности можно шлифовать путем подачи обрабатывающей среды под давлением через отверстие детали. Этот способ реализуется с применением устройства для абразивно-экструзионной обработки<sup>7</sup>.

Также внутренние поверхности деталей обрабатываются с помощью центробежно-планетарной обработки, когда жидкость с абразивными частицами загружается в контейнер, которому задают планетарное движение. Данный способ относится к методу обработки уплотненным шлифовальным материалом, разработанному и исследованному научной школой А. Н. Мартынова<sup>8</sup>.

Обработка деталей с мелкогабаритными каналами сложной формы (особенно в поперечном сечении) подобными способами практически исключается, поскольку невозможно обеспечить равномерную обработку по контуру детали. При обработке абразивным инструментом происходит шаржирование поверхности продуктами износа и микростружкой, что недопустимо для выполнения поставленных задач. Кроме того, при обработке поверхностей с покрытием неизбежно удаление некоторого припуска, уменьшающего толщину покрытия<sup>9</sup>.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является технология обработки внутренних поверхностей деталей с покрытием деформирующими рабочими телами.

Основной принцип нового метода обработки заключается в следующем. Обрабатываемые мелкогабаритные детали устанавливают в цилиндрический контейнер планетарной установки радиально с использованием специального приспособления. В полость канала детали загружают технологическую жидкость с рабочими телами (шарами) и закрывают полость технологической заглушкой. Затем контейнеру с деталями сообщают планетарное движение. Рабочие тела, перемещаясь в канале детали, контактируют с поверхностью покрытия и производят обработку.

При помощи технологии имитационного моделирования выявлены требуемые габариты экспериментальной установки [12–14], влияющие на скорости перемещения рабочих тел в контейнере. Наиболее эффективным методом моделирования в рассматриваемом случае является метод конечных элементов. Из имеющихся в настоящее время средств моделирования динамики контактного взаимодействия пакет ANSYS WORKBENCH [15–17] определен как наиболее продуктивный. Главной задачей моделирования был расчет скоростей удара скольжения, при

<sup>7</sup> Шаповал А.Н., Пивоваров М.Н., Золотарев Г.Р., Залевский В.А., Зленко А.А., Сытник А.А. и др. Устройство для обработки деталей абразивной массой, подаваемой под давлением. Авторское свидетельство 865643 СССР. 23 сентября 1981. <https://www.elibrary.ru/porhdz>

<sup>8</sup> Мартынов А.Н., Зверовщиков Е.З., Зверовщиков В.З., Зверовщиков А.Е., Афонин М.Д., Денисов Ю.В. и др. Способ центробежной абразивной обработки деталей и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство 1705040 СССР. 15 января 1992. <https://www.elibrary.ru/ddhfdad>

<sup>9</sup> Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкогабаритных деталях при центробежной обработке.



которых рабочие тела деформируют внутреннюю поверхность изделия в требуемых пределах.

В разработанных 3D-моделях заложена исходная шероховатость основы детали и покрытия ( $R_{\max} = 3$  мкм для покрытия и  $R_{\max} = 7$  мкм для основы). Адгезия в присутствии жидкости считалась незначимой.

Плотность покрытия из серебра составляет  $10\,500\text{ кг/м}^3$ , латунной основы детали –  $8\,800\text{ кг/м}^3$ , стали –  $7\,850\text{ кг/м}^3$ . Модуль упругости для серебра –  $85\,000\text{ МПа}$ , для латуни –  $80\,000\text{ МПа}$  и для стали –  $200\,000\text{ МПа}$ . Коэффициент Пуассона для серебра и латуни –  $0,37$ , для стали –  $0,3$ . Предел текучести –  $1\,382\text{ МПа}$  для серебра и для латуни –  $150\text{ МПа}$ . Модуль упрочнения серебра и латуни –  $500\text{ МПа}$ .

При подобных исследованиях основную проблему представляет моделирование сцепляемости покрытия и основания<sup>10</sup>. В работе принято допущение, что сцепляемость покрытия и основания не влияет на результаты вычислений. Они являются элементами с общей топологией, но разными материалами для образования общей сетки конечных элементов.

При моделировании исследуемая деталь жестко фиксировалась по нижней поверхности, а рабочему телу задавалась скорость движения под углом  $\alpha = 15^\circ$  к поверхности детали.

Разбиение на сетку конечных элементов происходит программно-управляемым способом.

Рассматривался единичный контакт рабочего тела с поверхностью детали, для этого было выбрано время наблюдения  $2 \cdot 10^{-6}\text{ с}$ .

Скорость  $V$  и диаметр  $D$  рабочего тела приняты в качестве входных факторов виртуального эксперимента. Откликами служили предельная величина деформации  $h$  верхнего слоя покрытия [18; 19] и основы детали. Кроме того, оценивались напряжения по фон Мизесу [20; 21].

Программное обеспечение «Канал»<sup>11</sup> позволило определить значения частот вращения планетарного механизма и коэффициента загрузки контейнера. Эти параметры обеспечивали расчетные скорости контактного взаимодействия рабочих тел с поверхностью.

Теоретическое прогнозирование шероховатости при пластическом деформировании поверхности предполагает изменения величины опорной площади контактирующих тел как функцию расстояния между ними<sup>12</sup>. По известной методике в качестве критерия принят показатель тангенса гладкости поверхности. Ввели параметр  $\gamma$ , зависящий от опорной длины профиля  $t_p(p)$ , который является ключевым для контактного взаимодействия.

<sup>10</sup> Шешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.

<sup>11</sup> Шешкин А.В., Зверовщиков А.Е. Программа для моделирования объемной обработки внутренних полостей деталей в контейнерах с планетарным вращением «Канал.ехе». Свидетельство о государственной регистрации № И121016120711 Российская Федерация. № И121016120711; заявл.; опубл. 16.10.2012. <https://clck.ru/3QW2ET>

<sup>12</sup> Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы; 1962. 383 с.

Параметр  $Ra$  деформируемой поверхности можно рассчитать по формуле (1)<sup>13</sup>:

$$Ra = \frac{\left( Rz - \sqrt[3]{\frac{6q_c}{k\gamma_1\gamma_2}} + 240 \frac{\sigma^2}{E^2} R \right)}{K} \quad (1)$$

где  $Rz$  – исходная шероховатость поверхности детали, м;  $q_c$  – давление по контуру, Па;  $k$  – приведенный коэффициент жесткости, Н/м<sup>3</sup>;  $\gamma_1, \gamma_2$  – параметры, определяемые по функции относительной опорной длины профиля  $t_p(p)$  для поверхностей обрабатываемой детали и индентора (стального рабочего тела);  $\sigma$  – предел текучести материала покрытия детали, Па;  $R$  – радиус рабочего тела, м;  $E$  – модуль упругости материала, Па;  $K$  – коэффициент (для отделочных методов обработки  $K = 4,5 - 5$ ).

Для эмпирического подтверждения достигаемого качества поверхности использован центробежно-планетарный стенд Д7Н.650.00.00, обеспечивавший в пределе 60-кратное утяжеление загрузки и рабочих тел.

В качестве модельных образцов применялись конфигурационно сходные комплексные детали из материала ДКРНТ 30 НД Л63 ГОСТ 2060-2006<sup>14</sup> с микронеровностями поверхности в пределах  $Ra$  0,95 мкм. На образцах использовано гальванически осажденное покрытие из серебра.

Рабочими телами объемной среды служила литая дробь сферической формы CHRONITAL фирмы Vulkan Inox GmbH (Германия), выполненная из высоколегированной стали. Этиловый спирт по ГОСТ 5962-2013<sup>15</sup> применялся при обработке в качестве смазочно-охлаждающего технологического средства.

Оценка высоты микронеровностей проведена профилометром Mitutoyo Surftest SJ-410 (Япония). Измерение параметров шероховатости производилось по ГОСТ 27964-88, параметры шероховатости определялись по ГОСТ 2789-73<sup>16</sup>.

План эксперимента составлен по известной методике<sup>17</sup>. Для экспериментальной проверки полученных теоретических данных выполнены однофакторные эксперименты.

Входными факторами эксперимента служили передаточное отношение  $z$  (уровни факторов от 1,1 до 1,9; интервал варьирования 0,2); степень заполнения полости волновода  $C$  (уровни факторов от 20 до 60 %; интервал варьирования 10 %); частота вращения валика  $n_1$  (уровни факторов от 60 до 140 об/мин; интервал варьирования 20 об/мин); время обработки  $t$  (уровни факторов от 2 до 10 мин; интервал варьирования 2 мин), в пределах варьирования которых, по расчетам в программе ANSYS и в программном обеспечении «Канал», должны были обеспечить расчетные значения шероховатости по формуле (1)<sup>18</sup>.

<sup>13</sup> Гурин П.А. Проектирование технологии отделочно-упрочняющей центробежной обработки на основе имитационного моделирования: дисс. ... канд. техн. наук. Пенза; 2013. 222 с.

<sup>14</sup> ГОСТ 2060-2006. Прутки латунные. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200048967> (дата обращения: 21.02.2025).

<sup>15</sup> ГОСТ 5962-2013. Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103298> (дата обращения: 21.02.2025).

<sup>16</sup> ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003160> (дата обращения: 21.02.2025).

<sup>17</sup> Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента: учеб. пособие. Свердловск: Свердловское изд. УПИ им. С.М. Кирова; 1975. 152 с.

<sup>18</sup> Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.



Экспериментальная модель по методике планирования эксперимента<sup>19</sup> для шероховатости  $Ra$  после деформационного воздействия приняла вид:

$$Ra = C_R \cdot z^x \cdot C^y \cdot n_1^z \cdot t^q \quad (2)$$

где  $C_R$  – общий коэффициент эмпирической модели;  $x, y, z, q$  – показатели степени.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ результатов виртуального эксперимента показал, что напряжения в зоне контакта не достигают напряжений разрушения для материала покрытия [22; 23]. Максимальное напряжение варьируется от 310 до 580 МПа, среднее напряжение – от 4 до 53 МПа при скоростях рабочего тела диаметром 0,2 мм от 10 до 70 м/с. Максимальные напряжения в материале основы детали составили от 140 до 440 МПа, средние значения напряжения от 5 до 52 МПа при скоростях рабочего тела от 10 до 70 м/с. Поэтому не следует ожидать разрушения поверхностного слоя покрытия и тем более основного материала. Однако контактные воздействия достаточны для пластической деформации серебра, что подтверждает реальность смятия микронеровностей обработкой пластическим деформированием [24–26].

Предельная величина деформации покрытия составила от 2,3 до 7,3 мкм при скоростях рабочего тела от 10 до 70 м/с. Максимально допустимая деформация, равная 3,4 мкм, была превышена при скорости рабочего тела 24 м/с.

Предельная величина деформации основы детали колеблется от 0,2 до 4,8 мкм при тех же скоростях. Скорости рабочих тел более 20 м/с приводят к деформации более 1 мкм.

Предельные скорости в диапазоне от 30 до 70 м/с создадут контактные напряжения, достаточные для деформации как покрытия, так и основы. Поэтому диапазон скоростей рабочих тел, при которых деформации основы детали остаются незначительными, следует принять от 10 до 20 м/с. Результат деформации покрытия, спрогнозированный для данного диапазона при контакте с рабочим телом диаметром  $D = 0,2$  мм со скоростью  $V = 20$  м/с, приведен на рисунке 1.

Изначально полученные значения скоростей использовались в качестве исходных данных для расчета технологических факторов обработки в ПО «Канал», значения которых составили: передаточное отношение  $z$  варьируется в диапазоне от 1,1 до 1,9; частота вращения водила  $n_1$  – от 60 до 140 об/мин, степень заполнения  $C$  рабочими телами полости волновода – от 20 до 60 %.

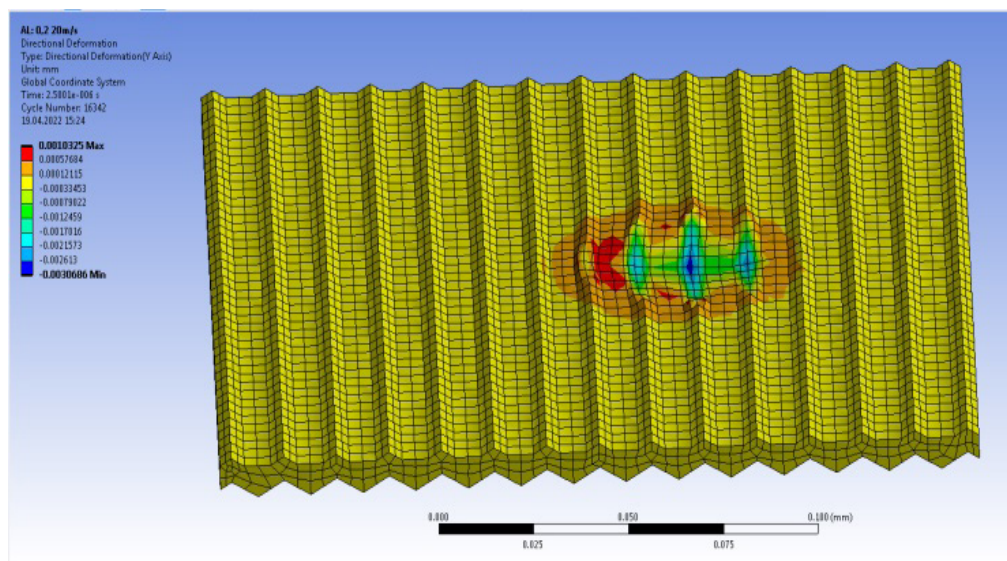
Проведенные экспериментальные исследования позволили получить эмпирическую зависимость для определения шероховатости  $Ra$  обработанных поверхностей по методике<sup>20</sup>.

$$Ra = 2,2 \cdot z^{0,7} \cdot C^{0,330} \cdot n_1^{-0,380} \cdot t^{-0,210} \quad (3)$$

<sup>19</sup> Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента.

<sup>20</sup> Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.

Для графической интерпретации полученных результатов построены однофакторные зависимости путем стабилизации значений остальных факторов на постоянном нулевом уровне ( $z = 1,5$ ;  $C = 40\%$ ;  $n_1 = 100$  об/мин;  $t = 6$  мин).



Р и с. 1. Деформация покрытия рабочей поверхности детали при диаметре  $D = 0,2$  мм со скоростью  $V = 20$  м/с

F i g. 1. Deformation of the coating of the working surface of the part at the diameter  $D = 0.2$  mm with a velocity  $V = 20$  m/s

Источник: рисунок сделан авторами статьи в программе Ansys.

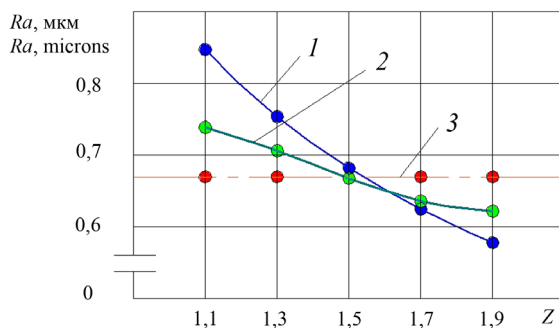
Source: the drawing is made by the authors of the article in the Ansys program.

На рисунке 2 в виде прямой 3 установлен лимитирующий уровень результирующей шероховатости  $Ra = 0,67$  мкм, который задан техническими требованиями на изделие и определяет качественные характеристики поверхности.

Выполненные исследования влияния передаточного отношения на результирующую шероховатость позволили утверждать, что значительное изменение динамического воздействия шаров с ростом их скорости за счет изменения частоты вращения контейнера существенно увеличивает пластическую деформацию выступающих неровностей обрабатываемой поверхности (рис. 2)<sup>21</sup>.

Рассчитанная по разработанной теоретической модели (1) шероховатость  $Ra$  показывает удовлетворительную сходимость с результатами выполненных экспериментов (3) (рис. 2 зависимости 1 и 2) при среднеквадратическом отклонении  $S = 0,057$  и критерии Фишера  $F = 4,8$ . Среднеквадратическое отклонение рассчитано как корень из среднего арифметического квадратов разности экспериментальных и теоретических значений.

<sup>21</sup> Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.



Р и с. 2. Зависимости шероховатости поверхности  $Ra$  от передаточного отношения  $z$ , полученные на режимах обработки ( $n_1 = 100$  об/мин;  $C = 40\%$ ;  $t = 6$  мин):  
 1 – данные эксперимента; 2 – расчетная зависимость;  
 3 – лимитирующий уровень шероховатости  $Ra$

F i g. 2. Dependences of surface roughness  $Ra$  on the gear ratio  $z$ , obtained in treating modes ( $n_1 = 100$  r/min;  $C = 40\%$ ;  $t = 6$  min):  
 1 – experimental data; 2 – calculated dependence; 3 – limiting roughness level  $Ra$

Источник: рисунок взят из автореферата диссертации А. В. Стешкина<sup>22</sup>.

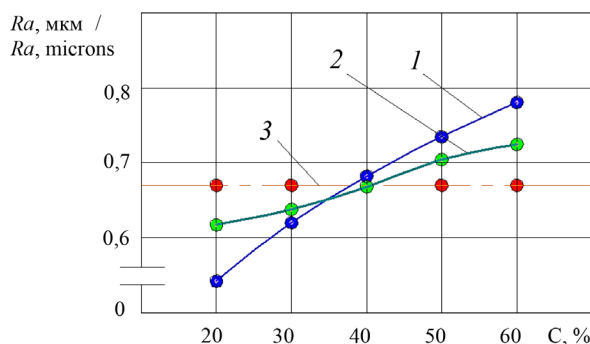
Source: the drawing is taken from the abstract of A.V. Steshkin's<sup>22</sup> dissertation.

С ростом заполнения контейнера рабочими шарами шероховатость поверхности  $Ra$  практически не изменяется в сравнении с исходной шероховатостью, измеренной до обработки (рис. 3). Ограниченное внутреннее пространство приводит к уменьшению средних скоростей контакта и динамического воздействия рабочих тел на обрабатываемую поверхность, что объясняется в значительной мере ростом угла их траектории движения по отношению к внутренней поверхности. Заметное снижение шероховатости отмечается при степени заполнения внутренней полости канала шарами на 20–30 %. Данные эксперимента по модели (3) (рис. 3 зависимость 1) и результаты вычислений по модели (1) адекватно соотносятся по среднеквадратическому отклонению  $S = 0,045$ . Критерий Фишера  $F = 4,4$ .

Для определения критических деформаций покрытия на образцах использовалась программа ANSYS. В результате расчета установлены предельные допустимые скорости на уровне 20 м/с при воздействии на поверхность покрытия стального тела размером 0,2 мм. Расчеты с применением ПО «Канал» показали, что такая скорость достигается при частоте вращения водила 123 об/мин. По результатам выполненных исследований установлен рабочий диапазон частот вращения водила – 105...120 об/мин.

При увеличении времени обработки  $t$  происходит снижение высоты неровностей и достигается заданный уровень параметра шероховатости  $Ra$  на обрабатываемых деталях. Длительное, в пределах 6–10 мин, и весьма интенсивное динамическое воздействие рабочих тел на внутреннюю поверхность деталей приводит к снижению высоты неровностей, улучшает качественные характеристики (рис. 4).

<sup>22</sup> Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.



Р и с. 3. Зависимости шероховатости поверхности  $Ra$  от степени заполнения контейнера  $C$ , полученные на режимах обработки ( $n_1 = 100$  об/мин;  $z = 1,5$ ;  $t = 6$  мин):

1 – данные эксперимента; 2 – расчетная зависимость;

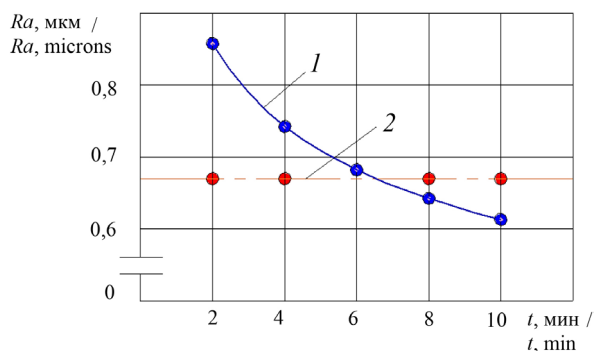
3 – лимитирующий уровень шероховатости  $Ra$

F i g. 3. Dependences of surface roughness  $Ra$  on the degree of filling of container  $C$ , obtained in processing modes ( $n_1 = 100$  r/min;  $z = 1.5$ ;  $t = 6$  min):

1 – experimental data; 2 – calculated dependence; 3 – limiting roughness level  $Ra$

Источник: рисунки 3–4 составлены авторами статьи.

Source: the drawing is made by the authors of the article.



Р и с. 4. Зависимости шероховатости поверхности  $Ra$  от времени обработки  $t$ , полученные на режимах обработки ( $n_1 = 100$  об/мин;  $C = 40\%$ ;  $z = 1,5$ ):

1 – данные эксперимента; 2 – граница допустимой шероховатости  $Ra$

F i g. 4. Dependences of the surface roughness  $Ra$  on the treating time  $t$ , obtained in the treating modes ( $n_1 = 100$  r/min;  $C = 40\%$ ;  $z = 1.5$ ):

1 – experimental data; 2 – the limit of the permissible roughness of  $Ra$

Опытным путем было установлено, что за указанный промежуток времени обеспечивается заданная техническими требованиями шероховатость, и превышение отмеченного времени экономически неэффективно. Анализ данных по времени обработки также показывает, что график переходит в стадию горизонтального выравнивания с приближением к значению шероховатости, которое характерно для данного метода обработки, отражая тем самым окончание создания заданного регулярного рабочего рельефа.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили возможность обеспечения требуемых параметров шероховатости сложнопрофильных внутренних поверхностей малого размера с покрытием посредством совершенствования центробежно-планетарной обработки.

Моделирование позволило определить скорости рабочих тел (шаров диаметром 0,2 мм), необходимые для пластической деформации покрытия из серебра без повреждения основы детали. При скорости рабочего тела более 24 м/с предельная деформация покрытия превышала допустимое значение в 3,4 мкм. При скоростях более 20 м/с деформация основы детали превосходила 1 мкм.

Максимальное напряжение в материале покрытия изменяется в пределах от 310 до 580 МПа, среднее напряжение – от 4 до 53 МПа при скоростях рабочего тела от 10 до 70 м/с. Максимальные напряжения в материале основы детали составили от 120 до 440 МПа, средние значения напряжения – от 5 до 52 МПа. Напряжения более 150 МПа (предел текучести латунной основы детали) наблюдались при скоростях рабочих тел более 20 м/с.

Было решено, что необходимо поддерживать диапазон скоростей рабочих тел от 10 до 20 м/с. На основе полученных данных с использованием программы «Канал» определены технологические факторы обработки, позволяющие обеспечить поддержание требуемых скоростей рабочих тел: передаточное отношение  $z$  варьируется в диапазоне от 1,1 до 1,9; частота вращения водила  $n_1$  от 60 до 140 об/мин, степень заполнения  $C$  рабочими телами полости волновода от 20 до 60 %.

Разработаны эмпирические модели, позволяющие рассчитывать оптимальные технологические режимы, что минимизирует расхождения между расчетными и экспериментальными значениями параметров шероховатости (расхождение экспериментальных и расчетных значений не превышает 6 %). Установлены ключевые зависимости между технологическими режимами обработки и результатами контактного взаимодействия рабочих тел с поверхностями деталей. Проведенные исследования заложили основу технологической подготовки обработки мелкоразмерных деталей с внутренними каналами, покрытых тонким слоем серебра. Дальнейшая работа по этой теме будет направлена на изучение особенностей использования различных материалов покрытия и основного материала.

В частности, установлено, что для достижения требуемого результата обработки стальными шарами диаметром 0,2 мм необходимо поддерживать частоту вращения водила в пределах от 105 до 120 об/мин при передаточном отношении немногим более 1,5 и степени заполнения контейнера от 25 до 30 %. При этом время обработки должно находиться в пределах от 6 до 10 мин.

Таким образом, разработанный способ обработки внутренних каналов сложной формы обеспечивает повышение эффективности производственного процесса, снижает затраты на отделочные операции и гарантирует достижение требуемого качества поверхностей. Полученные результаты и предложенные методики моделирования контактного воздействия деформирующих тел малого размера на поверхность с тонкослойным покрытием и определения кинематических

характеристик деформирующих рабочих тел, перемещающихся в объеме канала под воздействием инерционных сил при центробежно-планетарном движении, могут быть использованы для технологической подготовки производства в условиях серийного и мелкосерийного машиностроения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zverovshchikov A., Zverovshchikov V., Nesterov S. Comprehensive Ensuring of Quality of Surfaces of Details at Centrifugal-Planetary Volume Processing. In: MATEC Web of Conferences. 2018;224(3):01123. URL: <https://clck.ru/3QMaJW> (дата обращения: 15.02.2025).
2. Зверовщиков В.З., Зверовщиков А.Е., Скрыбин В.А., Гурин П.А. Совершенствование центробежной отделочно-упрочняющей обработки на основе моделирования взаимодействия рабочих тел с микрорельефом поверхностей деталей. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2013;(5):34–38. URL: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=1864](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1864) (дата обращения: 17.02.2025).
3. Bersirova O.L., Kublanovskii V.S. Crystalline Roughness as a Morphological Characteristic of the Surface of Electroplated Silver Coatings. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2009;82(11):1944–1948. <https://doi.org/10.1134/S1070427209100081>
4. Li Q.-X., Ma Z., Jiang B., Yao Y.-S. Edge Effect Modeling of Small Tool Polishing in Planetary Movemen. In: Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Shanghai; 2017;10710:1071030. <https://doi.org/10.1117/12.2317560>
5. Wang G.L., Wang Y.Q., Zhou H.B., Yan B.B. Experimental Research of the Elastic Abrasive Tool Used for Finishing Mould Surface. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;101–102:998–1001. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.101-102.998>
6. Степанов Ю.С., Афанасьев Б.И., Поляков А.И., Фомин Д.С., Кобзев Д.Л. Способ шлифования и полирования отверстий. Патент 2237567 Российская Федерация. 10 октября 2004. <https://www.elibrary.ru/ildygz>
7. Крайнов В.В., Тудакова Н.М., Фролова И.Н. Особенности применения электроплазменной обработки. *Труды Нижегородского университета им. П. Е. Алексеева*. 2013;(5):25–30. URL: <https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva/nomera-za-2013-god> (дата обращения: 22.02.2025).
8. Бабкина Л.А., Шестаков И.Я., Квасов А.С. Численное моделирование двумерных электростатических полей при электрохимическом полировании. *Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева*. 2009;(2):9–14. URL: <https://vestnik.sibsau.ru/vestnik/924/> (дата обращения: 22.02.2025).
9. Greyson E.C., Babayan Y., Odom T.W. Directed Growth of Ordered Arrays of Small-Diameter ZnO Nanowires. *Advanced Materials*. 2004;(16):1348–1352. <https://doi.org/10.1002/adma.200400765>
10. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Мордовцев А.А., Коханюк А.Г. Исследование вибрационной обработки наружных и внутренних поверхностей деталей при их подготовке под нанесение покрытия. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021;17(1):22–26. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-1-22-26>
11. Тамаркин М.А., Смоленцев Е.В., Колганова Е.Н. Анализ современного состояния финишных методов обработки в среде свободных абразивов деталей, имеющих малые пазы и отверстия. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019;15(1):122–129. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019>
12. Kazakov K.E. Modeling of Contact Interaction for Solids with Inhomogeneous Coatings. In: Journal of Physics: Conference Series. Cambridge. 2009;181(1):012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/181/1/012013>
13. Goryacheva I.G., Makhovskaya Yu.Yu. Elastic Contact between Nominally Plane Surfaces in the Presence of Roughness and Adhesion. *Mechanics of Solids*. 2017;52(4):435–443. <https://doi.org/10.3103/S0025654417040100>
14. Nguyen N.V., Pham T.H., Kim S.E. Strain Rate-Dependent Behaviors of Mechanical Properties of Structural Steel Investigated Using Indentation and Finite Element Analysis. *Mechanics of Materials*. 2019;137:103089. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103089>
15. Chen X., Liu Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. Boca Raton: CRC Press; 2018. 472 p. <https://doi.org/10.1201/9781351045872>



16. Kot M., Rakowski W., Lackner J.M., Major Ł. Analysis of Spherical Indentations of Coating-Substrate Systems: Experiments and Finite Element Modeling. *Materials & Design*. 2013;43:99–111. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.040>
17. Gao C., Proudhon H., Liu M. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Shallow Indentation of Rough Strain-Hardening Surface. *Friction*. 2019;7(6):587–602. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0245-3>
18. Csanádi T., Németh D., Lofaj F. Mechanical Properties of Hard W-C Coating on Steel Substrate Deduced from Nanoindentation and Finite Element Modeling. *Experimental Mechanics*. 2017;57:1057–1069. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0190-x>
19. Alaboodi A.S., Hussain Z. Finite Element Modeling of Nano-Indentation Technique to Characterize thin Film Coatings. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. 2019;31(1):61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.02.001>
20. Pérez E.A.R., Souza R.M. Numerical and Experimental Analyses on the Contact Stresses Developed During Single and Successive Indentations of Coated Systems. *Surface and Coatings Technology*. 2004;188-189:572–580. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.014>
21. Zha X., Jiang F., Xu X. Investigation of Modelling and Stress Distribution of a Coating/Substrate System after an Indentation Test. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;134:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.IJMECSCI.2017.10.002>
22. Pei L., Hyun S., Molinari J.F., Robbins M.O. Finite Element Modeling of Elasto-Plastic Contact between Rough Surfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005;53(11):2385–2409. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.06.008>
23. Jackson R.L., Green I. A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact Against a Rigid Flat. *Journal of Tribology*. 2005;127(2):343–354. <https://doi.org/10.1115/1.1866166>
24. Chan W.L., Fu M.W., Lu J. The Size Effect on Micro Deformation Behaviour in Micro-Scale Plastic Deformation. *Materials & Design*. 2011;32(1):198–206. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.011>
25. Kim G.Y., Ni J., Koç M. Modeling of the Size Effects on the Behavior of Metals in Microscale Deformation Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007;129(3):470–476. <https://doi.org/10.1115/1.2714582>
26. Tahir A., Li G.R., Liu M.J., Yang G.J., Li C.X., Wang Y.Y., и др. Improving WC-Co Coating Adhesive Strength on Rough Substrate: Finite Element Modeling and Experiment. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020;37:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.07.033>

## REFERENCES

1. Zverovshchikov A., Zverovshchikov V., Nesterov S. Comprehensive Ensuring of Quality of Surfaces of Details at Centrifugal-Planetary Volume Processing. In: MATEC Web of Conferences 2018;224(3):01123. Available at: <https://clck.ru/3QMaJW> (accessed 15.02.2025).
2. Zverovshchikov V.Z., Zverovshchikov A.E., Scryabin V.A., Gurin P.A. *Repair. Restoration. Modernization*. 2013;(5):34–38. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=1864](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1864) (accessed 17.02.2025).
3. Bersirova O.L., Kublanovskii V.S. Crystalline Roughness as a Morphological Characteristic of the Surface of Electroplated Silver Coatings. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2009;82(11):1944–1948. <https://doi.org/10.1134/S1070427209100081>
4. Li Q.-X., Ma Z., Jiang B., Yao Y.-S. Edge Effect Modeling of Small Tool Polishing in Planetary Movemen. In: Proceedings of the International Society for Optical Engineering, Shanghai; 2017;10710:1071030. <https://doi.org/10.1117/12.2317560>
5. Wang G.L., Wang Y.Q., Zhou H.B., Yan B.B. Experimental Research of the Elastic Abrasive Tool Used for Finishing Mould Surface. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;101–102:998–1001. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.101-102.998>
6. Stepanov Ju.S., Afanasev B.I., Poljakov A.I., Fomin D.S., Kobzev D.L. Method of Grinding and Polishing Holes. Patent 2237567. Russian Federation. 2004 October 10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/ildygz>
7. Krainov V.V., Tudakova N.M., Frolova I.N. Peculiarities of Employing Electric Plasma Treatment. *Transactions of Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev*. 2013;(5):25–30.

- (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva/nomera-za-2013-god> (accessed 22.02.2025).
8. Babkina L.A., Shestakov I.Ya., Kvasov A.S. Numerical Modeling by Two-Dimensional Electrostatic Fields at Electrochemical Polishing. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta im. Akademika M. F. Reshetneva*. 2009;(2):9–14. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.sibsau.ru/vestnik/924/> (accessed 22.02.2025).
  9. Greyson E.C., Babayan Y., Odom T.W. Directed Growth of Ordered Arrays of Small-Diameter ZnO Nanowires. *Advanced Materials*. 2004;(16):1348–1352. <https://doi.org/10.1002/adma.200400765>
  10. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Mordovtsev A.A., Kokhanyuk A.G. Study of Vibration Treatment of External And Internal Surfaces of Parts During their Preparation for Coating. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2021;17(1):22–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-1-22-26>
  11. Tamarkin M.A., Smolentsev E.V., Kolganova E.N. Analysis of the Modern Condition of Deburring Details Having Small Grooves and Holes in the Media of Free Abrasives. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(1):122–129. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019>
  12. Kazakov K.E. Modeling of Contact Interaction for Solids with Inhomogeneous Coatings. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Cambridge. 2009;181(1). P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/181/1/012013>
  13. Goryacheva I.G., Makhovskaya Yu.Yu. Elastic Contact between Nominally Plane Surfaces in the Presence of Roughness and Adhesion. *Mechanics of Solids*. 2017;52(4):435–443. <https://doi.org/10.3103/S0025654417040100>
  14. Nguyen N.V., Pham T.H., Kim S.E. Strain Rate-Dependent Behaviors of Mechanical Properties of Structural Steel Investigated Using Indentation and Finite Element Analysis. *Mechanics of Materials*. 2019;137:103089. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103089>
  15. Chen X., Liu Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. Boca Raton: CRC Press; 2018. <https://doi.org/10.1201/9781351045872>
  16. Kot M., Rakowski W., Lackner J.M., Major Ł. Analysis of Spherical Indentations of Coating-Substrate Systems: Experiments and Finite Element Modeling. *Materials & Design*. 2013;43:99–111. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.040>
  17. Gao C., Proudhon H., Liu M. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Shallow Indentation of Rough Strain-Hardening Surface. *Friction*. 2019;7(6):587–602. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0245-3>
  18. Csanádi T., Németh D., Lofaj F. Mechanical Properties of Hard W-C Coating on Steel Substrate Deduced from Nanoindentation and Finite Element Modeling. *Experimental Mechanics*. 2017;57:1057–1069. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0190-x>
  19. Alaboodi A.S., Hussain Z. Finite Element Modeling of Nano-Indentation Technique to Characterize thin Film Coatings. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. 2019;31(1):61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.02.001>
  20. Pérez E.A.R., Souza R.M. Numerical and Experimental Analyses on the Contact Stresses Developed During Single and Successive Indentations of Coated Systems. *Surface and Coatings Technology*. 2004;188-189:572–580. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.014>
  21. Zha X., Jiang F., Xu X. Investigation of Modelling and Stress Distribution of a Coating/Substrate System after an Indentation Test. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;134:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.10.002>
  22. Pei L., Hyun S., Molinari J.F., Robbins M.O. Finite Element Modeling of Elasto-Plastic Contact between Rough Surfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005;53(11):2385–2409. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.06.008>
  23. Jackson R.L., Green I. A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact Against a Rigid Flat. *Journal of Tribology*. 2005;127(2):343–354. <https://doi.org/10.1115/1.1866166>
  24. Chan W.L., Fu M.W., Lu J. The Size Effect on Micro Deformation Behaviour in Micro-Scale Plastic Deformation. *Materials & Design*. 2011;32(1):198–206. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.011>
  25. Kim G.Y., Ni J., Koç M. Modeling of the Size Effects on the Behavior of Metals in Microscale Deformation Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007;129(3):470–476. <https://doi.org/10.1115/1.2714582>

26. Tahir A., Li G.R., Liu M.J., Yang G.J., Li C.X., Wang Y.Y., et al. Improving WC-Co Coating Adhesive Strength on Rough Substrate: Finite Element Modeling and Experiment. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020;37:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.07.033>

*Об авторах:*

**Зверовщиков Александр Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7827-7462>, Researcher ID: Y-3779-2018, Scopus ID: 56891713100, SPIN-код: 9633-5769, azwer@mail.ru

**Стешкин Артем Вячеславович**, кандидат технических наук, заместитель главного инженера по развитию предприятия Федерального научно-производственного центра «Производственное объединение “Старт” им. М. В. Проценко» (442960, Российская Федерация, г. Заречный, пр-т Мира, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8850-7702>, asteshkin58@gmail.com

**Гурин Павел Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6045-5432>, SPIN-код: 3236-4508, sbgurin\_pavel@list.ru

**Миронычев Николай Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4393-9523>, Researcher ID: P-7228-2015, Scopus ID: 58074735200, minial@bk.ru

**Зотов Евгений Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9110-3995>, Researcher ID: GRX-2733-2022, SPIN-код: 8694-6570, zotovpvgu@gmail.com

**Скрябин Владимир Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, Researcher ID: R-2385-2018, Scopus ID: 6603685168, vs\_51@list.ru

*Вклад авторов:*

А. Е. Зверовщиков – формулировка замысла/идеи исследования, целей и задач; контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования.

А. В. Стешкин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных/доказательств; предоставление доступа к необходимым для исследования материалам.

П. А. Гурин – разработка методологии исследования, создание моделей; проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Н. А. Миронычев – применение статистических, математических, вычислительных методов для анализа для анализа данных исследования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Е. В. Зотов – создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

В. А. Скрябин – создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 18.02.2025; поступила после рецензирования 13.08.2025;  
принята к публикации 09.10.2025*

*Authors the contribution:*

**Alexandr E. Zverovshchikov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7827-7462>, Researcher ID: Y-3779-2018, Scopus ID: 56891713100, SPIN-code: 9633-5769, azwer@mail.ru

**Artem V. Steshkin**, Cand.Sci. (Eng.), Deputy Chief Engineer for Enterprise Development, Production Association “Start” named after M. V. Protsenko (1 Mira Ave., Zarechny 442960, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8850-7702>, asteshkin58@gmail.com

**Pavel A. Gurin**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6045-5432>, SPIN-code: 3236-4508, sbgurin\_pavel@list.ru

**Nikolay A. Mironychev**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4393-9523>, Researcher ID: P-7228-2015, Scopus ID: 58074735200, minial@bk.ru

**Evgenii V. Zotov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9110-3995>, Researcher ID: GRX-2733-2022, SPIN-code: 8694-6570, zotovpgu@gmail.com

**Vladimir A. Skryabin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, Researcher ID: R-2385-2018, Scopus ID: 6603685168, vs\_51@list.ru

*Authors contribution:*

A. E. Zverovshchikov – formulating the study plan/idea, aim and objectives; control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study.

A. V. Steshkin – conducting the study process, including conducting experiments or collecting data/evidence; providing access to materials necessary for research.

P. A. Gurin – developing the study methodology, creating models; testing reproducibility of experimental and study results within the framework of the main or additional tasks of the study; preparing the manuscript: visualizing the study results and data obtained.

N. A. Mironychev – using statistical, mathematical, computational methods for analyzing the study data; preparing the manuscript: visualizing the study results and data obtained.

E. V. Zotov – preparing the manuscript: writing the manuscript draft, including its translation into a foreign language.

V. A. Skryabin – preparing the manuscript: critical analysis of the manuscript draft, making comments and corrections by members of the research group, including at the stages before and after publication.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 18.02.2025; revised 13.08.2025; accepted 09.10.2025*