

Вып. 2(73)'2021 *ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ*



ISSN 2073-3216  
(E) ISSN 2518-7120

**ДОНЕЦКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

## *ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ*

**Международный  
сборник научных трудов**

**Выпуск 2 (73)' 2021**



**ДОНЕЦК - 2021**

ISSN 2073-3216  
(E) ISSN 2518-7120

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

*Посвящается 100-летию юбилею ДОННТУ*

## **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Международный сборник научных трудов

Основан в декабре 1994 года

Выходит 4 раза в год

**Выпуск 2 (73)' 2021**

**Донецк – 2021**

## УДК 621.01(06)

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 1 от 26 февраля 2021 г.)

В международном сборнике научных работ приведены некоторые вопросы теории и практики обработки изделий прогрессивными методами, показаны достижения и пути развития технологического оборудования, оснастки, металлорежущего инструмента и нанесения специальных покрытий на изделия машиностроения. Рассмотрены отдельные аспекты автоматизации производственных процессов и надежности технологического оборудования. Освещены современные проблемы материаловедения в машиностроении.

В данном сборнике публикуются ученые и ведущие специалисты из различных стран мира. Предназначен для научно-технических работников, ИТР и специалистов в области машиностроения.

**Учредитель и издатель – ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»** (Свидетельство о государственной регистрации юридического лица от 07.04.2016 г. № 029192 серия АА03).

Издается при содействии **Международного союза машиностроителей**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:** Михайлов А.Н. (гл. редактор), Гусев В.В. (зам. гл. редактора), Лахин А.М. (секретарь) (ДНР), Байков А.В. (ДНР), Бахадиров Г.А. (Узбекистан), Братан С.М. (Россия), Буленков Е.А. (ДНР), Бутенко В.И. (Россия), Витренко В.А. (ЛНР), Горобец И.А. (ДНР), Грубка Р.М. (ДНР), Данияров Н.А. (Казахстан), Еронько С.П. (ДНР), Ивченко Т.Г. (ДНР), Коваленко В.И. (ДНР), Мазуру С. (Молдова), Маляренко А.Д. (Беларусь), Мельникова Е.П. (ДНР), Навка И.П. (ДНР), Неделку Д. (Румыния), Поветкин В.В. (Казахстан), Прутяну О. (Румыния), Родованович М. (Сербия), Суслов А.Г. (Россия), Тока А. (Молдова), Федонин О.Н. (Россия), Хандожко А.В. (Россия), Чернышев Е.А. (ДНР), Шабаетов О.Е. (ДНР)

Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, кафедра ТМ. Тел.: +38 062 301-08-40

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org), Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики. Свидетельство о регистрации СМИ от 20 апреля 2017 г., серия ААА № 000125.

Сборник включен в перечень рецензируемых изданий ВАК ДНР (приказ №744 от 24.07.2017 г.), в котором могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, а также в базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)

**ISSN 2073-3216**

**ISSN 2518-7120 (E)**

© Авторы статей, 2021  
© ГОУВПО «ДОННТУ», 2021

**Г. А. Бахадиров**, д-р техн. наук, проф., **Г. Н. Цой**, канд. техн. наук,  
**А. М. Набиев**, мл.н.с., **А. А. Умаров**, мл.н.с.

Институт механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики  
Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

Тел./Факс: (+99871) 262-71-52; E-mail: [instmech@rambler.ru](mailto:instmech@rambler.ru)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ДАВЛЕНИЯ ВАЛКОВОГО СТЕНДА

*В работе для экспериментального валкового стенда разработан механизм давления рабочих валков. Механизм давления валкового стенда вертикального типа обеспечивает необходимое усилие прижима рабочих валков при отжиме избыточной жидкости из мокрых кожевенных полуфабрикатов в лабораторных условиях. В конструкции механизма давления предусмотрена легкая замена рабочих валков различного диаметра. Механизм давления рабочих валков прост в монтаже, демонтаже и эксплуатации.*

**Ключевые слова:** валковый стенд, отжимные валки, механизм давления, упругий элемент, усилие прижима.

**G. A. Bahadirov, G. N. Tsoy, A. M. Nabiev, A. A. Umarov**

## EXPERIMENTAL PRESSURE MECHANISM OF THE ROLL STAND

*In the article for the experimental roll stand, a work roll pressure mechanism has been developed. The pressure mechanism of the vertical roll stand provides the necessary pressing force of the working rolls when squeezing out excess liquid from wet leather semi-finished products in laboratory conditions. The design of the pressure mechanism provides for easy replacement of work rolls of various diameters. The work roll pressure mechanism is easy to assemble, disassemble and operate.*

**Key words:** roll stand, squeeze rolls, pressure mechanism, elastic element, clamping force.

### 1. Введение

Создание проходного оборудования для кожевенной промышленности является актуальной [1–4]. Повышение эффективности использования оборудования, повышение его производительности и качество выпускаемой продукции во многом зависит от подбора параметров [5–9].

Известно, что в процессе отжима мокрого кожевенного полуфабриката, удельный вес выделяемой влаги регулируется давлением, создаваемым между отжимными валами с помощью специальных механизмов. При этом на технологический процесс продвижения кожевенного полуфабриката в зону обработки как в конструкции отжимных машин горизонтального [2, 10–15], так и вертикального [4–3] типов влияют в основном следующие параметры (факторы) валковых технологических машин [16–19]:

- радиусы отжимных валов;
- зазор между отжимными валами;
- наличие водоотводящих покрытий отжимных валов;
- скорость втягивания материала в зону обработки;
- давление между отжимными валами;
- конструкция опорных плит, которые могут быть изготовлены в различных видах

[20]:

1. Монолитная–жесткая.
2. Перфорированная–жесткая.
3. Пористая.
4. Гибкая и др.



В данной последовательности отжимные валы могут быть выполнены как в отдельности, так и в их сочетании.

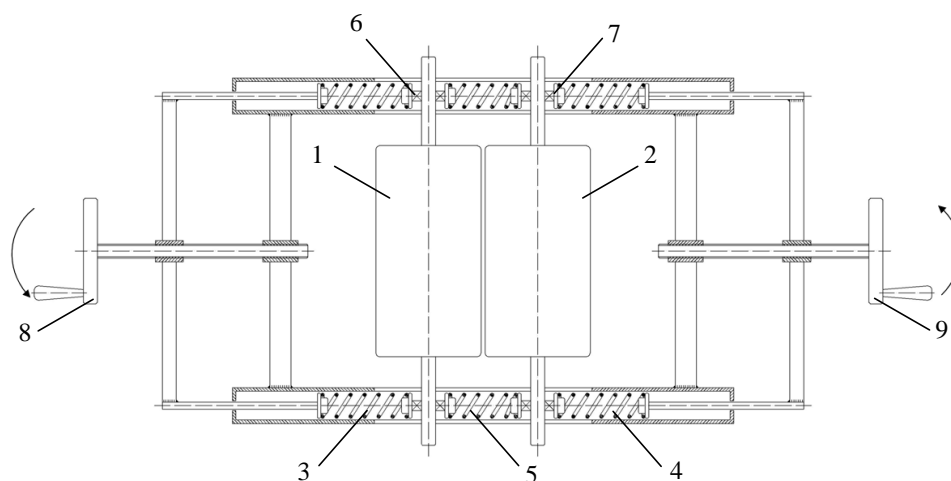
Все эти факторы (параметры) отжимной машины в процессе их проектирования варьируются в зависимости от требований технологических операций. В этой связи следует отметить, что одним из важных факторов, которые влияют на процесс отжима, является давление, создаваемое между отжимными валами и конструкции механизма регулирования давления [21-22].

## 2. Основное содержание и результаты работы

В работе рассматривается конструкция механизма регулирования давления между отжимными валами для машин вертикального типа.

На рис. 1 видно, что в этой конструкции применяются три упругих элемента (пружины) в каждой, т.к. упругие элементы установлены в цилиндрах с пазами и их крепления регулируется с двух сторон с помощью винтов, между двумя упругими элементами установлен один упругий элемент по середине, который предназначен для устранения ударных явлений, которые могут быть в процессе отжима, а также для отвода рабочих валов в сторону от зоны отжима после завершения процесса отжима.

Равномерный отжим влаги из мокрого кожевенного полуфабриката параллельно к линии хребта кожевенного полуфабриката зависит от рабочих параметров механизма регулирования давления между отжимными валами. Предлагаемая конструкция механизма регулирования давления между отжимными валами, выполненная на основе упругих элементов, позволяет обеспечивать более равномерного выделения влаги из мокрого кожевенного полуфабриката за счет того, что последний в процессе обработки заправляется на опорную плиту в перегиб, при этом давление между отжимными валами регулируется за счет упругой деформации пружин, применяемые в конструкции механизма регулирования давления между отжимными валами (рис. 2).

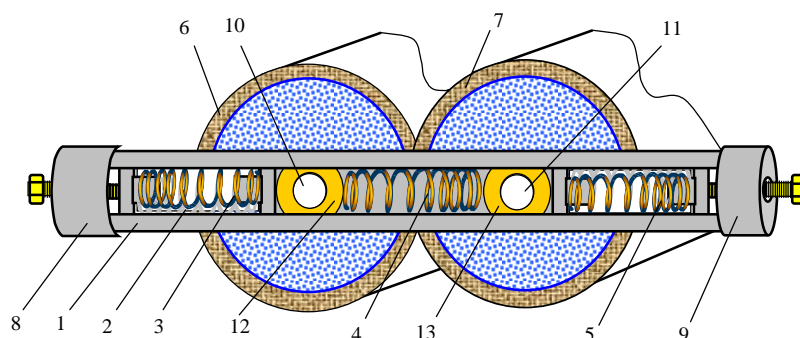


1, 2 – отжимные валы; 3, 4 и 5 – упругие элементы (пружины); 6, 7 – подшипники; 8, 9 – винты для регулирования усилия

Рисунок 1. Схема механизма регулирования давления между отжимными валами.

Следует отметить, что предлагаемая новая конструкция механизма регулирования давления между отжимными валами в дальнейшем может быть снабжена гидроси-

стемой, оставляя при этом или пренебрегая третьим упругим элементом, расположенным в середине двух упругих элементов.



1 – корпус; 2 – пазы; 3, 4 и 5 – упругие элементы (пружины); 6, 7 – отжимные валы; 8, 9 – винтики для регулирования давления; 10, 11 – оси рабочих валов; 12, 13 – подшипники качения

Рисунок 2. Вид сбоку механизма регулирования давления между отжимными валами.

В технологии механической обработки кожсырья, т.е. процесс отжима кожевенного полуфабриката с использованием специальной конструкции механизма подачи, где для подачи кожевенного полуфабриката в зону отжима по вертикальной плоскости применена опорная плита. Опорная плита по конструкции может быть различной, и она может выполняться из различных материалов, например, из древесины, металлокерамики и цветных металлов.

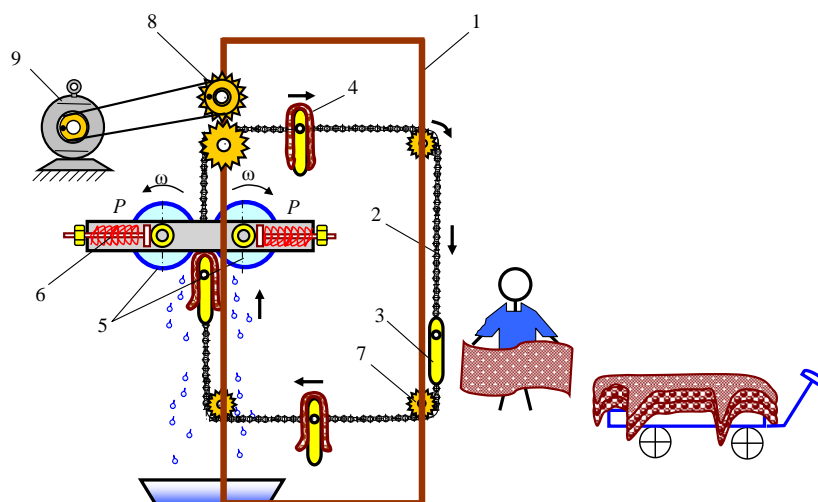
Размеры опорной плиты подбираются в зависимости от параметров кожевенного полуфабриката. Кроме того, основные размеры, например толщина и высота опорной плиты устанавливаются также, в зависимости от типа кожевенного полуфабриката, т.к. чем больше размеры кожевенного полуфабриката, тем больше размеры опорной плиты и усилие, возникающее на поверхности опорной плиты со стороны отжимных валов. В этой связи прочностные вопросы опорной плиты и ее рабочая форма должны быть исследованы и обоснованы путем проведения научно-исследовательских работ и ОКР.

Для совершенствования конструкции валковых отжимных машин нами предложен способ обработки кожевенного полуфабриката путем подачи его не по горизонтальной, а по вертикальной плоскости, используя опорной плиты (рис. 3, 4).

### 3. Общие рекомендации

В зависимости от конструкции опорной плиты, подача и условие втягивания кожевенного полуфабриката в зону отжима может быть рассмотрены следующим порядком:

1. Втягивание в начальной стадии, когда кончик опорной плиты с кожевенным полуфабрикатом входит в зону отжима;
2. Втягивание в переходной зоне, когда опорная плита с кожевенным полуфабрикатом, начиная с кончика, постепенно переходит в основную боковую зону по прямой линии;
3. Втягивание кожевенного полуфабриката на стадии установившегося движения;
4. Втягивание обработанного кожевенного полуфабриката на стадии выхода из зоны контакта между отжимными валами.



*1 – станина; 2 – цепь; 3 – опорная плита; 4 – кожевенный полуфабрикат; 5 – отжимные валы; 6 – упругий элемент; 7 – звездочка; 8 – привод; 9 – электродвигатель*

Рисунок 3. Схема отжимной валковой машины вертикального типа в рабочем состоянии.

Все эти позиции технологического процесса могут быть осуществлены, когда отжимные валы приводные или без привода, т.е. когда отжимные валы принудительно вращаются с помощью специального передаточного механизма, зубчатого или зубчато-рычажного типа, либо кожевенный полуфабрикат подается в зону отжима непосредственно опорной плитой подающим механизмом с помощью цепного устройства.

#### 4. Заключение

Таким образом при втягивании кожевенного полуфабриката в зону отжима необходимо выполнение следующих условий:

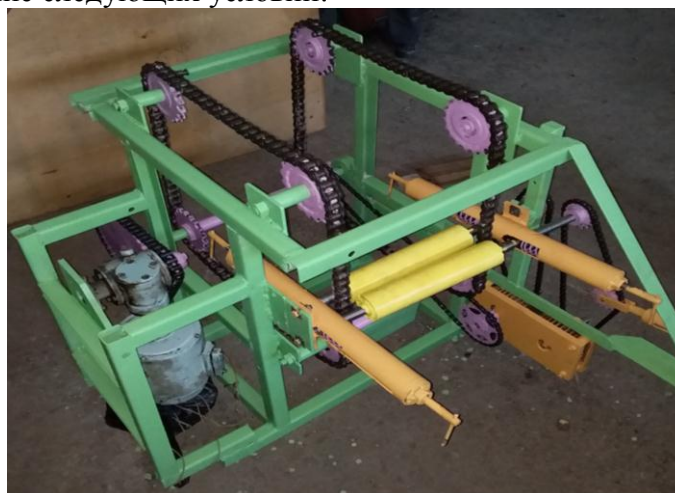


Рисунок 4. Экспериментальный валковый стенд для отжима мокрого кожевенного полуфабриката (ИМиСС АН РУз).

1. Угловые скорости отжимных валов должны быть строго равными, т.е. оба вала должны вращаться синхронно.

В случае нарушения синхронности вращения отжимных валов качество отжима ухудшается, т.к. на поверхности кожевенного полуфабриката могут появляться различные морщины, складки, и отжим влаги по всей поверхности будет осуществляться не равномерно, что приводит к нежелательным бракам кожевенного полуфабриката [6].

2. Линейная скорость по вертикали опорной плиты должна быть согласована с угловой скоростью отжимных валов:

а) Если линейная скорость опорной плиты будет опережать угловые скорости отжимных валов, то отжим кожевенного полуфабриката будет преждевременным, в результате чего отжим происходит частично.

б) Если линейная скорость опорной плиты будет отставать от угловых скоростей отжимных валов, то кожевенный полуфабрикат будет отжиматься с определенной растяжкой, что может влиять на дальнейшее увеличение полезной площади кожевенного полуфабриката, но в пределах допустимого. В данном случае отдельное значение имеет усилие между отжимными валами.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бурмистров, А. Г. Машины и аппараты производства кожи и меха / А. Г. Бурмистров. – М.: КолосС, 2006. – 384 с.

2. Бахадиров, Г. А. Механика отжимной валковой пары. / Г. А. Бахадиров – Ташкент: Фан, 2010. – 156 с.

3. Luo, F. Progress and mechanism of breaking glycoconjugates by glycosidases in skin for promoting unhairing and fiber opening-up in leather manufacture. / F. Luo, X. Zhong, M. Gao et al. A review. J Leather Sci Eng 2, 12. 2020. – <https://doi.org/10.1186/s42825-020-00025-0>.

4. Bahadirov, G. A. Experiments on Moisture Squeezing from a Leather Semi-Finished Product / G. A. Bahadirov, G. N. Tsoy, A. M. Nabiev, A. A. Umarov // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Volume-8 Issue-5, January. – 2020. pp. 3367-3371. doi:10.35940/ijrte.E6125.018520

5. Preethi S. Probing horseradish peroxidase catalyzed degradation of azo dye from tannery wastewater. / S. Preethi, A. Anumary, M. Ashokkumar et al. // SpringerPlus 2, 341. 2013. – <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-341>.

6. Bahadirov, G. Study of the efficiency of squeezing moisture-saturated products / G. A. Bahadirov, G. Tsoy, A. Nabiev // EUREKA: Physics and Engineering, (1). – 2021. pp. 86-96. – <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001606>

7. Mehta, M. Raman and atr-ftir spectroscopy towards classification of wet blue bovine leather using ratiometric and chemometric analysis. / M. Mehta, R. Naffa, C. Maidment et al. // J Leather Sci Eng 2, 3. 2020. – <https://doi.org/10.1186/s42825-019-0017-5>.

8. Аманов, Т. Ю. Устройство для обеспечения усилия прижима между рабочими органами валковых технологических машин / Т. Ю. Аманов, С. Д. Баубеков, Г. Н. Цой, А. М. Набиев // Современные наукоемкие технологии. – Пенза: – 2018. - № 9. – С. 9–14.

9. Бахадиров, Г. А. Механизмы транспортирования и расправления кожполуфабриката. / Г. А. Бахадиров // Техника машиностроения. – Москва, 2002. – №2. – С. 9-13.

10. Бахадиров, Г. А. Разработка устройств транспортирования и подачи листовых материалов в зону обработки. / Г. А. Бахадиров, Н. Б. Сайдахметова, А. А. Умаров // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и приклад-

ной механики. Аннотации докладов. (Казань, 20 – 24 августа 2015 г.). – Казань: Издательство Академии наук РТ, 2015. – С. 35.

11. Luo, F. Progress and mechanism of breaking glycoconjugates by glycosidases in skin for promoting unhairing and fiber opening-up in leather manufacture. / F. Luo, Zhong X., Gao M., Peng B. and Long Z. // A. review J. Leather Sci. 2020. Eng. 2 12.

12. Бахадиров, Г. А. Отжим мокрого кожполуфабриката с использованием влаготводящего сукна. / Г. А. Бахадиров, Г. Н. Цой, А. М. Набиев // Международный сборник научных трудов Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – № 4(71). – С. 3-8.

13. Бахадиров, Г. А. Многослойная обработка волокнистых материалов. / Г. А. Бахадиров, Г. Н. Цой, А. М. Набиев // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – Севастополь, 2020. – № 3(11). – С. 3-11.

14. Wright, D. M. Deformation, yield, relaxation and recovery in partially processed leather. / D. M. Wright // Doctoral thesis. University of Leicester. 1996. – <http://nectar.northampton.ac.uk/2660/>.

15. Danylkovych, A. Plasticification of leather semifinished chrome tanning using biocatalytic modifier / A. Danylkovych, S. Bilinskiy and Y. Potakh. EUREKA 2018. Phys. Eng. 1 12–8.

16. Бахадиров, Г. А. Математическая модель управляющего клиноременного вариатора / Г. А. Бахадиров // Вестник Нижегородского Государственного университета им. Н.И.Лобачевского. – Нижний Новгород, 2011. – №4. – Ч. 2. – С. 59-60.

17. Zhang Y. Collagen structure changes during chrome tanning in propylene carbonate. / Y. Zhang, J. K. Buchanan, G. Holmes, B. W. Mansel and S. // J. Prabakar. 2019. Leather Sci. Eng. 1 8.

18. Бахадиров, Г. А. Исследование механизма расправки листовых материалов. / Г. А. Бахадиров // Вестник ТГТУ: Четырехязычный научно-теоретический и прикладной журнал широкого профиля. – Тамбов: ТГРУ, 2004. – Т. 10. – № 1Б. – С. 212-219.

19. Kagunyu, A. W. Camel hides: Production, marketing and utilization in pastoral regions of northern Kenya Pastor. / A. W. Kagunyu, F. Matiri and E. Ngari // 2013. Res. Policy Pract. 3 25.

20. Бахадиров, Г. А. Классификация и анализ опорных плит валковой машины / Г. А. Бахадиров, А. М. Набиев // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXIV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-17 сентября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 32-35.

21. Бахадиров, Г. А. Пути повышения качества механической обработки кожполуфабриката валковыми машинами. / Г. А. Бахадиров // Вестник Курганского университета. Серия «Технические науки». – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. – Вып.2. – Ч.1. – С. 17-18.

22. Бахадиров, Г. А. Условия деформирования листового материала с постоянной массой между валковой парой. / Г. А. Бахадиров, М. У. Мусиров, А. М. Набиев // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении: науч. журн. – 2019. – №2 (6) – С. 20-25.

23. Preethi S. Probing horseradish peroxidase catalyzed degradation of azo dye from tannery wastewater. / S. Preethi, A. Anumary, M. Ashokkumar and P. Thanikaivelan // 2013. Springerplus 2 341.

Поступила в редколлегию 02.02.2021 г.

УДК 621.9.015:658.52.011

**В. И. Бутенко**, д-р техн. наук, проф.  
Донской государственный технический университет  
E-mail: [butenkowiktor@yandex.ru](mailto:butenkowiktor@yandex.ru)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЁЖНОСТЬ

*Рассмотрена эффективность процессов шлифования и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин. Установлена функциональная связь между параметрами шероховатости обработанных поверхностей деталей и вероятностью достижения их при заданном значении относительного отклонения допусков на заданные параметры поверхностного слоя. Представлена блок-схема назначения рациональных режимов обработки плоских поверхностей деталей с обеспечением её требуемой безотказной работы.*

**Ключевые слова:** деталь, финишная обработка, параметры качества, эффективность, критерий, относительное отклонение допуска, вероятность обеспечения параметра.

**V. I. Butenko**

### PARTS EFFICIENCY FINISHING OPERATIONS AND THEIR TECHNOLOGICAL RELIABILITY

*The grinding processes efficiency and surfaces finishing-strengthening treatment is considered. A functional relationship between the treated surfaces roughness parameters and the probability of achieving them at a given tolerances for the specified surface layer parameters is established. Flat surface finishing block diagram with ensuring its required trouble-free operation is presented.*

**Keywords:** part, finishing, quality parameters, efficiency, criterion, relative deviation of tolerance, probability of providing the parameter.

### 1. Введение

Технологический процесс механической обработки большинства деталей машин включает финишные операции, основными из которых являются шлифование, отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием, тонкое точение, хонингование, суперфиниширование и другие. Эффективность операций финишной обработки поверхностей деталей машин обычно оценивается достигаемыми показателями качества поверхностного слоя по параметрам шероховатости и состоянию материала, производительностью обработки и стойкостью используемого инструмента. В настоящее время разработаны различные пути устойчивого обеспечения требуемых показателей качества поверхностного слоя деталей при одновременном повышении производительности обработки и стойкости инструмента [1]. Среди них одно из ведущее мест занимают направления повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин, включая совершенствование конструкции абразивного инструмента; разработка и исследование новых абразивных материалов, обладающих высокой работоспособностью и прочностью; оптимизация состава абразивной массы для изготовления абразивного инструмента и введение в него компонентов, повышающих эффективность обработки; разработка и использование способов активации подаваемой в зону обработки смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) или смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) и другие [2]. В связи с этим у технологов машиностроительных предприятий возникает проблема выбора эффективной финишной операции обработки конкретной детали с учётом производственных условий предприятия и обеспечения технологической надёжности операции.

## 2. Основное содержание и результаты работы

По результатам выполненных экспериментальных исследований [1 – 3] было установлено, что критерием для выбора наиболее эффективного состава шлифовального круга и режимов обработки с учётом ограничений, обусловленных точностью изготовления детали, требованиями качества поверхностного слоя (допустимой высотой шероховатости, минимизацией прижогов, величиной технологических остаточных напряжений и т.д.) и надёжностью технологической операции может быть коэффициент шлифовального круга  $K_{шк}$ , определяемый по формуле

$$K_{шк} = \frac{\sigma_m \cdot J_m}{N}, \quad (1)$$

где  $\sigma_m$  – предел текучести обрабатываемого материала, Па;  $J_m$  – интенсивность съёма металла, м<sup>3</sup>/с;  $N$  – мощность, затрачиваемая на процесс шлифования, Вт.

Как показали исследования, коэффициент  $K_{шк}$  является индивидуальным для каждого конкретного шлифовального круга, определяется его составом и состоянием и не зависит от режимов обработки детали, т.к. с их изменением изменяется и мощность  $N$ . С увеличением коэффициента  $K_{шк}$  производительность обработки увеличивается, а мощность  $N$ , затраченная на процесс шлифования, уменьшается, что обеспечивает снижение себестоимости обработки. При шлифовании поверхностей деталей из железоуглеродистых сплавов величина коэффициента  $K_{шк}$  изменяется в диапазоне  $(0,95 - 2,53) \times 10^{-4}$  в зависимости от вида используемого абразивного материала, его зернистости, состава абразивной массы, вида и твёрдости связки, пористости и других факторов, характеризующих шлифовальный круг.

Однако использование в практике металлообработки формулы (1) не позволяет разработчикам технологических процессов механической обработки деталей гарантировать заданное эксплуатационными условиями качество получаемого поверхностного слоя с требуемой надёжностью. При этом у разработчиков технологических процессов возникает необходимость учёта технологической наследственности при формировании показателей качества поверхностного слоя детали, что предопределяет их предварительную вероятностную оценку для конкретного технологического процесса [3]. В связи с этим задача совместного решения вопросов повышения эффективности финишных операций механической обработки деталей и обеспечения параметрической надёжности получаемых показателей качества поверхностного слоя имеет большую практическую значимость.

Были проведены экспериментальные исследования параметрической надёжности технологических операций обработки цилиндрических поверхностей деталей, подвергаемых предварительному чистовому точению и последующему шлифованию. Исследования проводились на образцах из стали 12Х2Н4А диаметром 32 мм и длиной 280 мм. Предварительное чистовое точение осуществлялось на токарно-винторезном станке мод. 16К20 резцами с пластинками твёрдого сплава Т15К6 со скоростью резания 0,67 м/с, подачей 0,1 мм/об и глубиной резания 0,3 мм. Последующее шлифование деталей осуществлялось на круглошлифовальном станке мод. 3М151 кругами ПП 400×127×60 14АФ60К7V ГОСТ Р 52587-2006 при скорости резания  $V_{кр} = 34,8$  м/с, скорости вращения образцов  $V_d = 0,314$  м/с, продольной подаче  $S_{пр} = 0,02$  м/с, подаче врезания (глубине резания)  $S_{вр} = 0,01$  мм/дв.ход. В качестве СОЖ использовался 5-процентный водный раствор эмульсола Укринол-1. Обработка поверхностей деталей велась как стандартными шлифовальными кругами, так и кругами, подвергнутыми импрегнированию в водном растворе диодидом хрома по технологии, описанной в работе [4].

Используя методику исследования закономерностей изменения параметров качества поверхности детали, в процессе обработки, изложенную в работах [5 – 7], для выявления наиболее значимых параметров шероховатости поверхностного слоя детали на её эксплуатационные показатели (износостойкость и коррозионно-усталостную прочность) были построены диаграммы Парето, позволившие установить следующие наиболее значимые параметры шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789-73:

- среднее арифметическое отклонение профиля неровностей  $Ra$ ;
- наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$ ;
- средний шаг неровностей профиля  $S_m$ .

В исследованиях определялась функциональная связь между параметром надёжности обеспечения требуемых значений  $Ra$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$  в процессе обработки детали  $p(t)$  и относительными отклонениями допусков на них  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$ , установленных конструкторами и вычисляемых по формулам:

$$\delta_1 = 2 \frac{(Ra)_{max} - (Ra)_{min}}{(Ra)_{max} + (Ra)_{min}}; \quad \delta_2 = 2 \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max} + R_{min}}; \quad \delta_3 = 2 \frac{(S_m)_{max} - (S_m)_{min}}{(S_m)_{max} + (S_m)_{min}}, \quad (2)$$

где  $(Ra)_{max}$ ,  $(Ra)_{min}$ ,  $R_{max}$ ,  $R_{min}$ ,  $(S_m)_{max}$ ,  $(S_m)_{min}$  – максимальные и минимальные значения исследуемых параметров шероховатости поверхности детали, определяющие их допуск.



Рисунок 1. Зависимости вероятности технологического обеспечения надёжности  $p(t)$  параметров шероховатости  $Ra$  (кривые 1, 4, 7),  $R_{max}$  (кривые 2, 5, 8) и  $S_m$  (кривые 3, 6, 9) от величины относительного отклонения допусков на них  $\delta$  при чистовом точении и последующем шлифовании стандартным и импрегнированным кругом деталей из стали 12Х2Н4А

В исследованиях область факторного пространства определялась допустимыми диапазонами изменения параметров шероховатости поверхности детали  $Ra$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ , определяющих значения относительных отклонений допуска  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  при обязательном обеспечении заданной точности диаметра обработанной детали 30h7 (-0,021) мм. По



результатам выполненных экспериментальных исследований были построены графики зависимостей  $p(t) = f(\delta)$  по каждому значимому параметру шероховатости (рис. 1).

Анализ полученных графиков свидетельствует о том, что вероятность формирования параметров шероховатости  $Ra$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$  при заданных значениях относительных отклонений допуска  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  зависит не только от способа финишной обработки поверхности детали, но и от состояния используемого инструмента. Так, при значении  $\delta_1 = 0,3$  вероятность формирования параметра шероховатости  $Ra$  составляет  $p(t) = 0,5$  при чистовом точении,  $p(t) = 0,80$  при шлифовании стандартным кругом и  $p(t) = 0,94$  при шлифовании кругом, импрегнированным диоксидом хрома. Для параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  вероятность обеспечения  $\delta_2 = 0,3$  составляет соответственно 0,47 при чистовом точении, 0,76 при шлифовании стандартным кругом и 0,90 при шлифовании импрегнированным кругом. При  $\delta_3 = 0,3$  с вероятностью  $p(t) = 0,57$  обеспечивается параметр  $S_m$  при чистовом точении,  $p(t) = 0,84$  при шлифовании стандартным кругом и  $p(t) = 0,89$  при шлифовании импрегнированным кругом.

Из представленных на рис. 1 графиков следует, что при часто задаваемой вероятности обеспечения параметров шероховатости обработанной поверхности детали  $p(t) = 0,9$  необходимо задать значение относительного отклонения допуска  $\delta_1$  на параметр  $Ra$  не менее 0,62 при чистовом точении, 0,38 при шлифовании стандартным кругом и 0,26 при шлифовании импрегнированным кругом; на параметр  $R_{max}$  необходимо задать значение относительного отклонения допуска  $\delta_2$  не менее 0,62 при чистовом точении, 0,40 при шлифовании стандартным кругом и 0,30 при шлифовании импрегнированным кругом; на параметр  $S_m$ , соответственно,  $\delta_3 = 0,55$  при чистовом точении,  $\delta_3 = 0,38$  при шлифовании стандартным кругом и  $\delta_3 = 0,32$  при шлифовании импрегнированным кругом. Согласно исследованиям, выполненным в работах [5 – 7], такое различие в назначении величин относительного отклонения допуска  $\delta$  по параметрам шероховатости обработанной поверхности детали  $Ra$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$  обусловлено сложной зависимостью надёжности  $p(t)$  от величины  $\delta$ , которая может быть оценена показателем информационной энтропии, учитывающим не только способ финишной обработки поверхности детали, но и состояние инструмента, условия и режимы обработки, технологическую наследственность, жёсткость используемой технологической системы и другие факторы [8].

В практике машиностроительного производства в качестве финишных операций обработки поверхностей деталей широко применяются различные способы отделочно-упрочняющей обработки (ОУО), например, упрочняющая обкатка плоских поверхностей деталей роликом [1]. С помощью диаграммы Парето было установлено, что при чистовом фрезеровании поверхности детали значимыми параметрами качества поверхностного слоя являются  $Ra$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ , а при обкатке плоской поверхности упрочняющим роликом значимыми параметрами качества поверхностного слоя, влияющие на его эксплуатационные показатели, являются среднее арифметическое отклонение профиля неровностей  $Ra$  и наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$ . По-видимому, это обусловлено тем, что при обкатке плоской поверхности детали упрочняющим роликом шаг неровностей вдоль продольной подачи формируется исключительно шероховатостью рабочей поверхности упрочняющего ролика и точностью его изготовления, а в поперечном направлении неровности практически не образуются вследствие перекрытия фаской рабочего профиля ролика поперечной подачи.

Для установления функциональной связи между относительными допусками на параметры  $Ra$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$  и вероятностью их технологического обеспечения  $p(t)$  с учётом

технологической наследственности проведены исследования процесса формирования параметров шероховатости на 64 образцах из стали 12Х2Н4А с размерами  $B \times H \times L = 50 \times 30 \times 150$  мм, подвергаемых обработке по маршруту: чистовое фрезерование – обкатка упрочняющим роликом. Предварительное чистовое фрезерование исследуемых поверхностей образцов осуществлялось на вертикально-фрезерном станке мод. 6П13 торцовыми фрезами диаметром 125 мм с механическим креплением сменных многогранных пластин 86410 вк8 (16×6×3×18) по ГОСТ 26595-2014 (ISO 6462:2011). Были приняты следующие режимы фрезерования: скорость резания  $V_{фр} = 1,63$  м/с, минутная подача  $S_{мин} = 40$  мм/мин (подача на зуб фрезы  $S_z = 0,01$  мм/зуб, число зубьев фрезы  $Z_f = 16$ ), глубина резания  $t = 0,5$  мм. Обкатка поверхностей образцов осуществлялась при помощи устройства для упрочняющей обработки плоских поверхностей [2], которое устанавливалось в шпинделе вертикально-фрезерного станка мод. 6П13. Радиус упрочняющего ролика из закалённой быстрорежущей стали Р6М5 составлял 42 мм и имел рабочий профиль радиусом  $R = 16$  мм. Обкатка производилась на следующих режимах: усилие обкатки  $P = 800$  Н, продольная подача  $S_{пр} = 0,02$  м/с, число проходов  $m = 1$ .

Результаты исследования функциональной зависимости между относительными допусками на параметры  $Ra$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$  и вероятностью их технологического обеспечения  $p(t)$  в виде графиков приведены на рис. 2, из анализа которого следует, что применение в качестве финишной обработки поверхностного слоя детали обкатки упрочняющим роликом позволяет существенно уменьшить величину относительного отклонения допуска  $\delta$  по параметрам

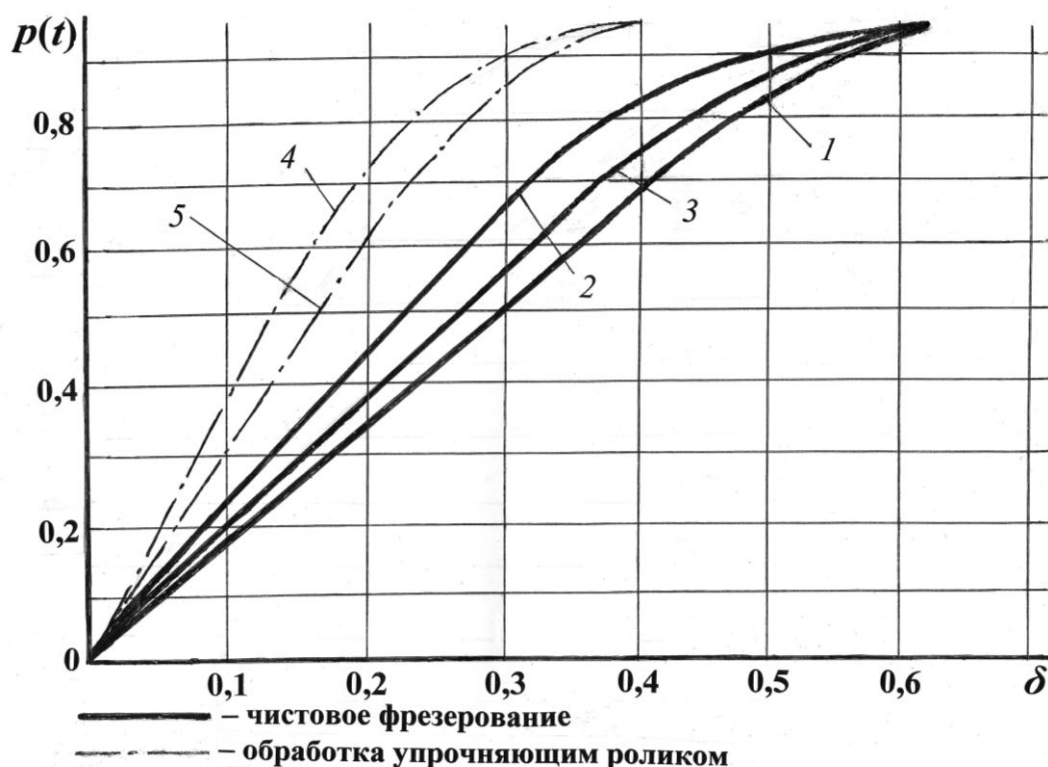


Рисунок 2. Зависимости вероятности технологического обеспечения параметров шероховатости  $Ra$  (кривые 1, 3) и  $S_m$  (кривые 2, 4) от величины относительного отклонения допусков на них  $\delta$  при чистовом фрезеровании и последующей обкатке упрочняющим роликом плоских поверхностей деталей из стали 12Х2Н4А

шероховатости обработанной поверхности детали при обеспечении заданной вероятности достижения параметров  $Ra$  и  $R_{max}$ . Так, с вероятностью  $p(t) = 0,6$  величина относительного отклонения допуска  $\delta_1$ , устанавливаемого на параметр  $Ra$ , составит 0,35 при чистовом фрезеровании и 0,19 при обкатке поверхности упрочняющим роликом. Соответственно, при  $p(t) = 0,6$  для параметра шероховатости  $R_{max}$  величина относительного отклонения допуска  $\delta_2$  составит 0,27 при чистовом фрезеровании и 0,16 при обкатке упрочняющим роликом. При этом величина относительного отклонения допуска  $\delta_3$  при чистовом фрезеровании поверхности детали составит 0,33.

Если задать вероятность обеспечения параметров шероховатости обработанной поверхности детали  $p(t) = 0,9$ , то необходимо установить на значения величин относительного отклонения допусков при чистовом фрезеровании  $\delta_1 = 0,56$ ,  $\delta_2 = 0,50$ ,  $\delta_3 = 0,54$ ; при обкатке поверхности упрочняющим роликом значения величин относительного отклонения допусков составят:  $\delta_1 = 0,30$ ,  $\delta_2 = 0,34$ . По заданным значениям  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  могут быть назначены режимы обработки детали, используя, например, блок схему назначения режимов обработки плоских поверхностей деталей с обеспечением вероятности безотказной работы детали (рис. 3).

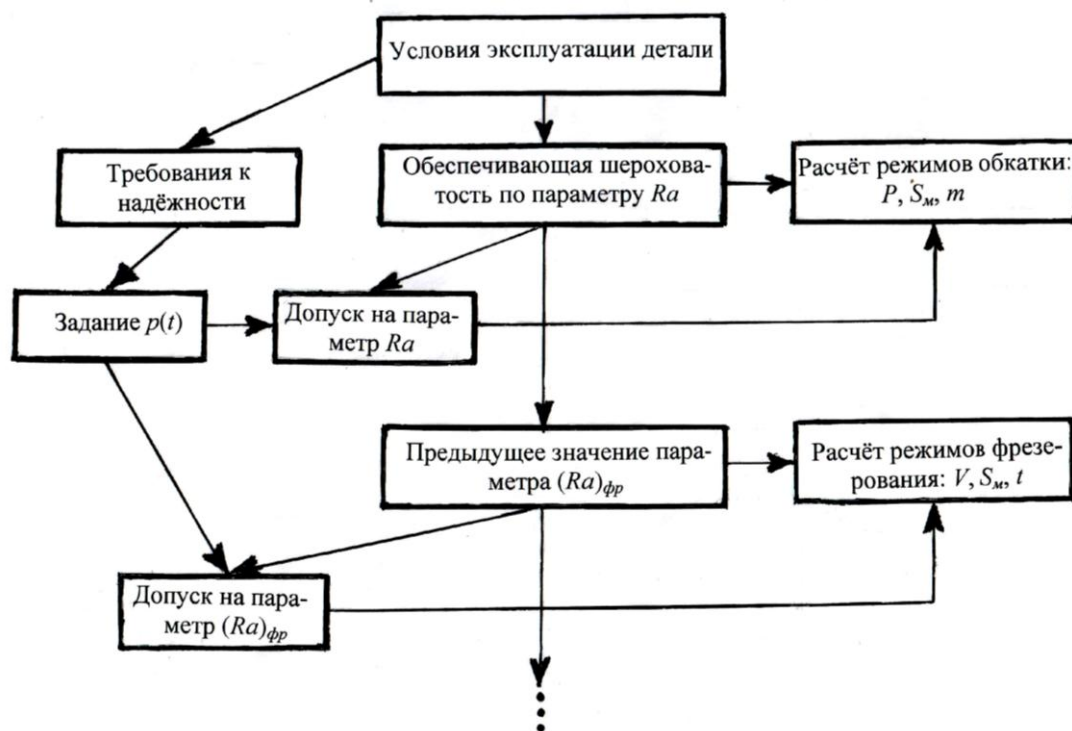


Рисунок 3. Блок-схема назначения режимов обработки поверхностей с обеспечением вероятности безотказной работы деталей  $p(t)$

### 3. Заключение

Таким образом, по результатам выполненных исследований можно сформулировать две технологические задачи, от решения которых зависит эффективность финишной обработки детали:

1 – задавая величины относительного отклонения допусков  $\delta$  на параметры шероховатости поверхности детали, можно определить вероятность их обеспечения;

2 – зная требуемую по условиям эксплуатации вероятность обеспечения параметров шероховатости поверхности детали, можно установить значения величин относительного отклонения их допусков  $\delta$ .

Успешное решение этих задач в машиностроительном производстве возможно при тесном контакте технологов с конструкторскими и эксплуатационными службами предприятия.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бутенко, В. И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издат центр ДГТУ, 2017. – 481 с.
2. Бутенко, В. И. Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства, инструменты / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2016. – 219 с.
3. Бутенко, В.И. Оценка параметрической надёжности технологических систем и операций по параметрам качества поверхностного слоя обрабатываемой детали / В. И. Бутенко, А. В. Тарасов, Л. В. Гусакова // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2020. – С. 633 – 637.
4. Пат. 2703063 Российской Федерации МПК В24Д 3/34. Способ импрегнирования абразивных инструментов / В. И. Бутенко, К.В. Давиденко. – 2019. – Бюл. №29.
5. Нагоркин, М.Н. Оценка влияния технологической наследственности на процесс формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием / М.Н. Нагоркин // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – 2019. – №5. – С. 125-130.
6. Фёдоров, В. П. Надёжность и диагностика технологических систем механообработки; учеб. пособие / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин. – Брянск: Изд.-во БГТУ, 2013. – 116 с.
7. Фёдоров, В. П. Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва. – Брянск: Изд.-во БГТУ, 2012. – 192 с.
8. Гоголев, А. Я. Надёжность оборудования ГПС и качество обработки / А. Я. Гоголев, В. И. Бутенко, А. В. Чистяков. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1992. – 184 с.

Поступила в редколлегию 15.02.2021 г.

УДК 62-405.8

**В. А. Витренко**, д-р техн. наук, проф., **Г. В. Сыровой**, канд. техн. наук, доцент,  
**В. А. Перевозчиков**, аспирант,  
ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени В. Даля»  
E-mail: [siiig26@mail.ru](mailto:siiig26@mail.ru)

## УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛОПЛАСТИКОВОГО БАЛЛОНА НА ОСНОВЕ НАНОАРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ

*В статье рассмотрено повышение ресурса металлопластикового баллона на основе наномодификации полимерной матрицы. Были проведены исследования стандартного баллона на ресурс, изготовленного из стеклонити. Определено что композитные материалы влияют на ресурс лайнера баллона. В качестве наномодификатора в статье рассмотрен Аэросил А-300, описаны его физические свойства и влияние на композитную матрицу. Предложено использовать данный материал в качестве модификатора в эпоксидную матрицу при намотке металлокомпозитного баллона*

**Ключевые слова:** эпоксидная матрица, наномодификатор, аэросил, металлопластиковый баллон, ресурс, технология изготовления.

**V. A. Vitrenko, G. V. Syrovoy, V. A. Perevozchikov**

## THE INCREASE IN RESOURCE EXPLOITATION PLASTIC CONTAINER BASED ON THE NANOREINFORCING COMPOSITE SHELL

*The article considers the increase of the resource of metal-plastic balon on the basis of nanomodification of the polymer matrix. Studies of the standard balloon on the resource made of glass, were carried out. It is determined that composite materials affect the resource of the balloon liner. As a nanomodifier, the article examines the Aerosil A-300, describes its physical property and influence on the composite matrix. It is proposed to use this material as a modifier in the epoxy matrix when winding metal composite balon*

**Keywords:** epoxy matrix, nanomodifier, aerosil, metal-plastic balon, manufacturing technology

### 1. Введение

Металлопластиковые баллоны высокого давления по критерию массового совершенства показали свое преимущество по сравнению со стальными баллонами и продолжают использоваться в средствах дыхательных систем и средств спасения [1,2].

Металлопластиковые баллоны изготавливаются методом «мокрой» намотки на металлический лайнер, служащий герметизирующим слоем, композитной оболочки из стеклонитей, органонитей или угленитей с дальнейшей пропиткой связующим. Такие баллоны имеют установленный ресурс, который с введением новых требований постоянно изменяется [3,4].

В процессе эксплуатации металлопластиковые баллоны подвержены циклическому нагружению внутренним давлением, при котором в металле лайнера возникают усталостные повреждения, приводящие к потере герметичности. Поэтому увеличения ресурса эксплуатации металлопластиковых баллонов можно достигнуть использованием гибридной намотки волокнистым материалом. Одновременно можно защитить эти волокна от химических, атмосферных и других внешних воздействий, а также увеличить воспринимаемость усилий, развивающихся в композите при работе под нагрузкой путём введения наноразмерных частиц различной природы в матрицу связующего [5,6].

**Целью данной работы:** является исследование технологических режимов намотки за счет использования полимерных композиционных материалов с изменением

структуры армирования и наномодификации полимерной матрицы увеличивающих ресурс эксплуатации металлопластикового баллона.

## 2. Материал и метод.

Экспериментальные исследования показали, что баллоны, спроектированные на статическую прочность с нормативным коэффициентом безопасности 2,61, при числе циклов нагружения от 800 до 1000 рабочим давлением теряют герметичность из-за усталостного разрушения лейнера. При этом возникла задача создания и экспериментального подтверждения теории и методики расчета композитных баллонов на заданное число циклов нагружения с учетом минимальной массы и стоимости конструкции. Специфика эксплуатации баллонов такова, что они за время своего ресурса работают в режиме малоциклового нагружения ( $10^2$ – $10^4$ ). Автомобильные баллоны для газообразного топлива должны быть рассчитаны на ресурс в количестве 15 000 заправок, а для летательных аппаратов – не менее 5000 [7].

В металлокомпозитном баллоне из-за разных предельных деформаций металла и пластика в металлической части баллона возникают значительные деформации, приводящие к снижению ресурса. Поэтому с целью определения ресурса было изготовлено десять одинаковых баллонов, на рабочее давление 15,0 МПа, намотанных по стандартной схеме и из одного композитного материала. Для определения запаса прочности три баллона были разрушены внутренним давлением  $40,0 \pm 0,5$  МПа. Оставшиеся семь были подвергнуты циклическому нагружению внутренним давлением различной величины с замером относительных деформаций в стенке баллона на каждом уровне внутреннего давления.

## 3. Исследование металлопластиковых баллонов

Баллоны испытывались водой с периодом нагружения 3...4 сек от нуля до заданного давления, при этом производилось измерение относительных деформаций по осевых и окружных направлениях. В процессе испытаний баллоны теряли герметичность на цилиндрической части, появлением капель воды на мелованной эмульсии нанесенной на поверхность композитной части баллона. После испытаний, для установления характера разрушения, с баллонов снималась стеклопластиковый слой, а лейнер испытывался воздухом для обнаружения усталостной трещины. Трещины располагались вдоль образующей, поперек наибольшей из окружных деформаций.

Таблица 1. – Значения ресурса эксплуатации металлопластиковых баллонов в зависимости от относительных деформации обечайки.

№ бал.	P, МПа	$\epsilon_{oc}$ , %	$\epsilon_{окр}$ , %	$\epsilon_{экв}$ , %	N, цикл.
1	15,0	0,157	0,542	0,559	1550
2	15,0	0,161	0,546	0,563	3380
3	15,0	0,165	0,539	0,559	2178
4	15,0	0,151	0,549	0,559	1819
5	10,0	0,115	0,382	0,396	3220
6	10,0	0,111	0,378	0,388	7970
7	10,0	0,109	0,383	0,393	3982

Усталостных разрушений композитного слоя на баллонах не обнаружено, результаты испытаний приведены в таблице 1.

Проведенный эксперимент показал, что ресурсом обечайки или металлической части лайнера баллона можно управлять намоткой композитного слоя не только однотипной нитью, но используя гибридную намотку несколькими семействами нитей. Для достижения конструкционной прочности намоточные слои также можно чередовать между собой. Например, спиральный слой наматывать из стеклонити, а кольцевой из угленити. Таким образом, достигается равнопрочность в слоях баллона. Но технологически сложно при серийном производстве, во время процесса намотки заменять марку нити. Поэтому добавление в матрицу определенного количества наноматериала при намотке, дает возможность не менять марку нити и намотку проводить одним семейством нитей. Таким образом, можно не только изменять свойства слоев композитного материала, но и увеличить заданный ресурс металлопластикового баллона.

На основании этого были сформулированы основные задачи, по увеличению ресурса эксплуатации металлопластиковых баллонов (рис. 1).

Специфика композитного материала такова, что независимо от того, производится ли оно непосредственно на предприятии или приобретается, перед намоткой металлокомпозитных баллонов подвергается тем или иным технологическим операциям, в процессе которых изменяются некоторые из его геометрических параметров, а, следовательно, и физико-механические характеристики.



Рисунок 1. Схема задач повышения ресурса эксплуатации металлопластиковых баллонов

В связи с этим, актуальной представляется задача разработки технологического обеспечения всех требований к связующим и армирующим материалам в тех случаях, когда их характеристики выходят за рамки допустимых значений, вследствие отклонений, подлежащих целенаправленной корректировке в процессе изготовления металлокомпозитных баллонов. Эта задача должна решаться в рамках экспериментально-теоретического подхода.

#### 4. Исследование композитного слоя металлопластикового баллона

Стекловолокно является одним из самых распространенных материалов, используемых при намотке металлопластиковых баллонов, поэтому в своих исследованиях остановимся на данном материале и совместимым с ним наномодификатором – аэросилом.

Свойства стекловолокон определяются, в первую очередь, составом стекла. Стекло E – конструкции, требующие невысокой упругости и усталостной прочности. Стекло S – легковесные конструкции, выдерживающие большие нагрузки. Основной причиной такого широкого диапазона значений основных характеристик стеклонитей является наличие дефектов в волокнах и влияние на них атмосферной влаги.

В качестве эпоксидного связующего используем эпоксидные смолы. Эпоксидные смолы представляют собой смесь олигомерных продуктов с эпоксидными группами на концах звеньев. Эпоксидные связующие обладают хорошей адгезией к различным волокнам, могут длительное время находиться в неотвержденном состоянии, что позволяет изготавливать на их основе предварительно пропитанные и частично отвержденные полуфабрикаты (препреги). Модифицированные эпоксидные связующие имеют повышенную теплостойкость с работоспособностью при температуре до 200°C.

Для изготовления наномодифицированной композитной оболочки и прогнозирования её свойств была проведена идентификация структуры и дисперсности самого наномодификатора. Самый распространенный метод исследований структуры - рентге

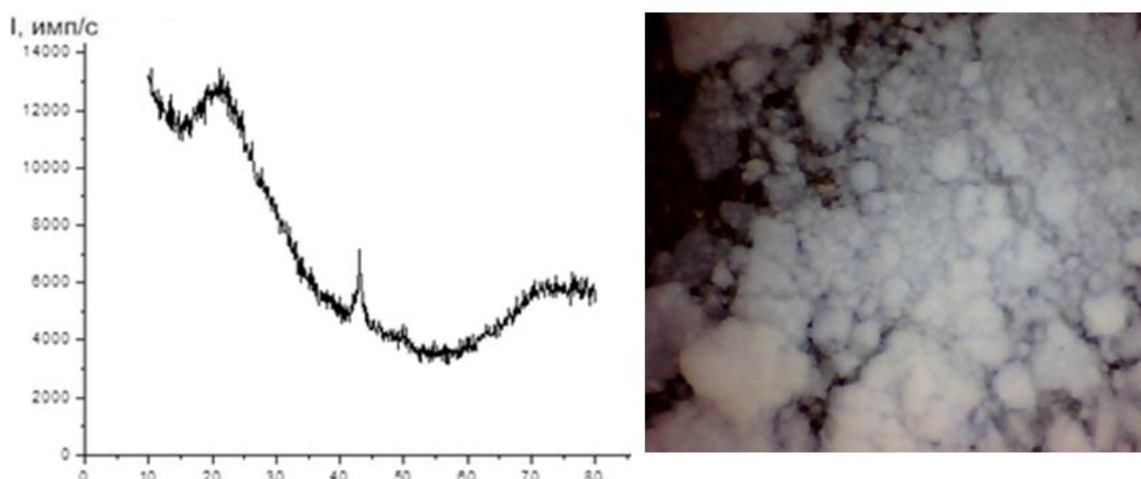


Рисунок 2. Дифрактограмма и микроструктура аэросила А-300

ноструктурный анализ. При этом рентгенограммы получены на дифрактометре ДРОН-И в интервале углов 10-70°, излучение  $\text{CuK}\alpha$ , (1,5406 Å) а микроструктура образцов-



свидетелей на микроскопе типа POLMI.

На рентгенограмме аэросила А-300 (ГОСТ 14922-77), (рис. 2) отчетливо индицируются рефлексы от плоскостей 101: 112: 100, что соответствует кристаллической структуре  $\text{SiO}_2$  гексагональной модификации. Примесные линии не идентифицировались. Дисперсность порошков до 5 нм.

Проведенное сравнение изученных модификаторов по дисперсности (5-100 нм), удельной поверхности ( $\tau$ ) и удельной плотности ( $\rho$ ) показало, что их можно использовать как наномодификаторы для дальнейших исследований и прослеживания количественного и качественного влияния модификатора на физико-химические свойства наномодифицированного материала на основе эпоксидного компаунда.

Исследования показали, что введение наномодификатора аэросил А-300 до 5% не приводит к изменению основного расстояния в структуре матрицы, но снижает её интенсивность. Вероятно, дисперсность  $\text{SiO}_2$  позволяет внедриться в сетчатую структуру матрицы (рис.3).

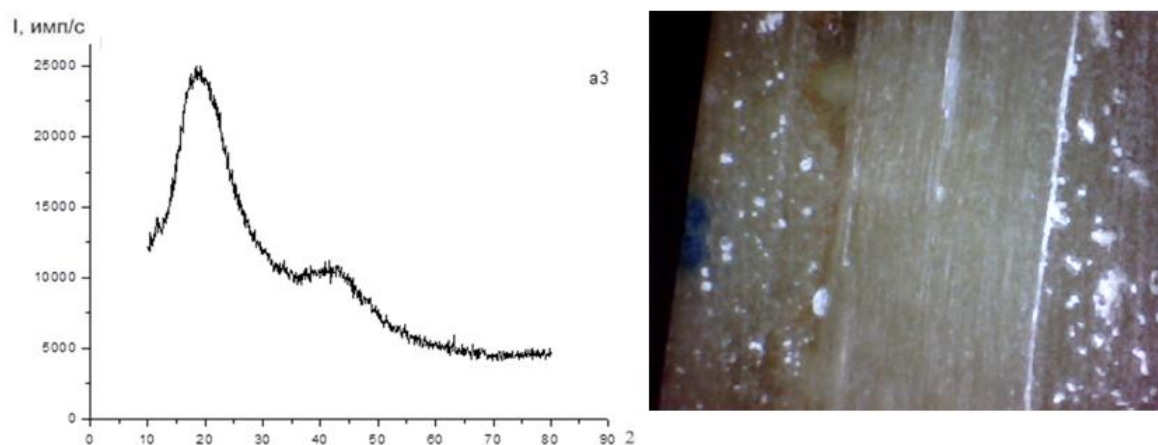


Рисунок 3. Дифрактограмма и микроструктура эпоксидного композиционного материала+3% аэросила А-300

Изменение интенсивности максимумов, характеризующих структурируемые блоки и расстояния между ними в полимере, находится в зависимости от количества вводимого модификатора.

На основе рациональных режимов получения модифицированных полимерных композитов был разработан механизм взаимодействия наномодификаторов с полимерной матрицей, что послужило основой для разработки технологии намотки металлопластиковых баллонов, повышающих их ресурс.

## 5. Выводы

1. Проведенные испытания показали, что ресурс эксплуатации металлопластиковых баллонов напрямую зависит от технологии их намотки и этим процессом можно управлять.

2. Наноармирование композитной оболочки позволило:

- увеличить адгезионную прочность полимерного композита при введении в него 1-2% наномодифицированного материала в 1,5 раза;

- повысить показатели герметичности на 30% при введении наномодификатора до 2%;

- увеличить прочность однниточного микропластика на основе стекловолокна при 1-2% наномодификации аэросилом на 15%.

3. Разработанный технологический процесс намотки металлопластиковых баллонов на основе наномодифицированной полимерной матрицы, позволит увеличить ресурс эксплуатации в 1,5 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Витренко, В. А. Повышение ресурса малогабаритных корпусов на основе оптимизации структурных параметров намотки/ В. А. Витренко, Г. В. Сыровой // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2016. – №2(17) – С. 82-90.

2. Ивановская, О. В. Методы проектирования металлокомпозитных баллонов высокого давления для систем летательных аппаратов и конверсионного назначения: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / О. В. Ивановская // Национальный аэрокосмический университет (ХАИ). – Харьков: ХАИ, 2002. – 160 с.

3. Игуменов, М. С. Разработка технологии изготовления гибридного сосуда высокого давления методом ротационного формования и линейного полиэтилена с применением армирования: дис. .... канд. техн. наук / М. С. Игуменов: Санкт-Петербургский государственный технологический институт. – Санкт-Петербург, 2015. – 145.

4. Молочев, В. П. Разработка композиционных баллонов давления для космической техники / В. П. Молочев // Механика композиционных материалов и конструкций. – М, 2010. – Т. 16. – № 4. – С. 587-596.

5. Сыровой, Г. В. Определение несущей способности металлического лейнера композитного баллона / Г. В. Сыровой, Н. В. Ивин, Е. В. Синдеева // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. – С. 80-87.

6. Малков, И. В. Механизм модификации полимерных композитов наночастицами / И. В. Малков, А. Г. Макухин, Г. В. Сыровой // Вестник Тамбовского государственного технологического университета – Тамбов: ТГТУ, 2016. – Т.22. – № 1. – С.98-107.

7. Пименов, И. В. Расчет баллона высокого давления из ПВХ лейнера и базальтопластиковой силовой оболочки / И. В. Пименов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 36. – С. 77-94.

Поступила в редколлегию 10.02.2021 г.

УДК 622.232.72

**И. А. Горобец**, канд. техн. наук, проф.

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР

E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

## ВЫБОР 3D ФОРМЫ ЗУБЬЕВ РЕЙКИ КОЛЕСНО - РЕЕЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ

*Приняты ограничения, допущения и критерии для исследования формы и расположения линии зацепления зубьев колеса и рейки движителя объекта. Определены параметры линии зацепления при условии минимизации работы сил трения. Предложены варианты 2D и 3D профиля зубьев рейки движителя. Приведены критерии для выбора наилучшего профиля зубьев рейки. Определены наилучшие формы 3D профиля зубьев рейки для тяжело нагруженных условий работы движителя.*

**Ключевые слова:** параметр, форма, зубья, колесо, рейка, критерий, влияние

**I. Gorobets**

### 3D SHAPE SELECTION OF THE RACK TEETH FOR A GEAR RACK AND PINION MOVER

*Restrictions, assumptions and criteria for studying the shape and location of the line of engagement of the teeth of the gear rack and pinion are accepted. The parameters of the gear line are determined under the condition of minimizing friction forces. Variants of the 2D and 3D profile of the propeller rail teeth are offered. The criteria for choosing the best profile of the rack teeth are given. The best forms of the 3D profile of the rack teeth for the heavily loaded driving conditions have been determined.*

**Keywords:** parameter, shape, teeth, gear, rail, criterion, influence

#### 1. Введение

В настоящее время одним из исполнительных механизмов для реализации поступательного перемещения объектов являются колесно-реечные зубчатые передачи, рис.1. Такими движителями комплектуют объекты транспортного, горного, автомобильного, аэрокосмического и военного машиностроения. Задачей таких движителей является преобразование вращательного движения зубчатого колеса в поступательное движение зубчатой рейки или объекта и крутящего момента на приводном колесе в усилие перемещения.



Рисунок 1. Вид колесно-реечного движителя.

Колесно-реечные движители имеют ряд особенностей. К таким особенностям можно отнести наличие трения скольжения зубьев вращаемого зубчатого колеса и перемещаемой рейки (либо объекта). Наличие трения скольжения и специфика геометрии профиля зубьев движителя приводят к нежелательным последствиям, сопровождающимся:

- ухудшением силовых и кинематических характеристик механизма движителя, при которых возникают значительные знакопеременные радиальные усилия зацепления и неравномерность линейной скорости перемещения объекта (либо зубчатой рейки) [1];

- высокой динамической нагруженностью зубчатого зацепления и узлов взаимодействия объекта с зубчатой рейкой, вызванных знакопеременным характером, нерав-

номерностью и значительными показателями радиального усилия (R) зацепления [1,2], рис. 2, приводящая к снижению долговечности движителя;

- снижением КПД зубчатой передачи, мгновенные величины которого могут находиться в пределах 0,30 – 0,93 [1,2];

- наличием износа контактирующих поверхностей зубьев, снижающее долговечность приводных элементов движителя [3,4].

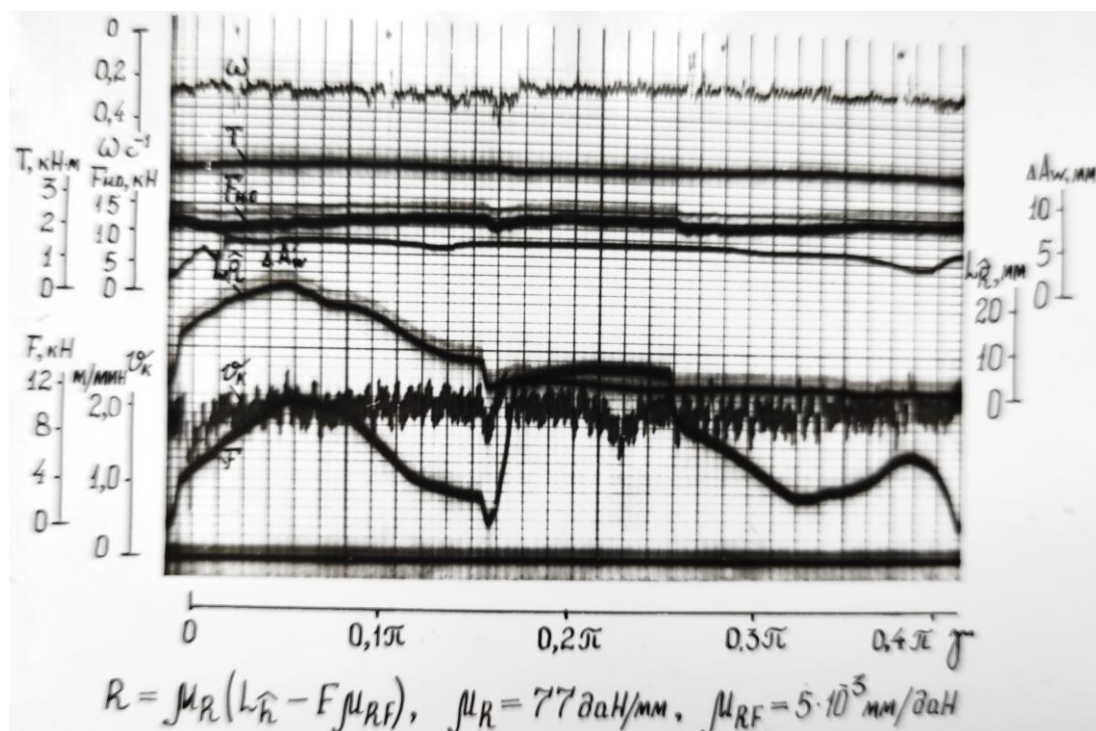


Рисунок 2. Фрагмент реализации кинематических и силовых характеристик зацепления зубьев колесно-речного движителя очистного комбайна КА-80.

В связи с перечисленными особенностями зубчатого зацепления колёсно-речного движителя актуальным является вопрос снижения негативных последствий взаимодействия зубчатых пар движителя за счёт определения наилучшей формы линии зацепления зубчатой передачи движителя и рациональной 3D формы зубьев рейки.

**Целью исследований** является определение рациональной 3D формы зубьев рейки, путём синтеза наилучших формы и расположения линии зацепления зубчатой передачи колесно-речного движителя.

## 2. Основное содержание и результаты

Рациональную форму линии зацепления зубчатой передачи колесно-речного движителя определим исходя из энергетической компоненты процесса зацепления. В качестве критерия для определения рациональной формы линии зацепления примем минимальную работу сил трения  $A_{тр}$ . Тогда, геометрическое место точек линии зацепления  $Q$  можно описать зависимостью

$$Q_j^* \{ \rho_{wj}, \alpha_{wj} \} \quad \text{при } A_{тр} \rightarrow A_{трmin} \quad (1)$$

где  $\rho_{wj}, \alpha_{wj}$  – полярные координаты точки контакта зубьев, а  $A_{тр}$  – работа сил трения.

- В качестве допущений при проведении исследований приняты:
- потери мощности от перекатывания профилей зубьев колеса и рейки пренебрежимо малы по сравнению с потерями мощности при скольжении зубьев;
  - коэффициент трения скольжения зубьев является постоянным и не зависит от скорости;
  - податливость зубьев колеса и рейки при взаимодействии не значима и в расчётах не учитывается;
  - колебания крутящего момента на валу приводного зубчатого колеса не значимы;
  - изменения межцентрового расстояния в процессе зацепления зубьев колеса и рейки не оказывают влияния на кинематические и силовые параметры;
  - изменения шага зубьев рейки не влияют на кинематические и силовые параметры зацепления и не учитываются в исследованиях.

Для решения задачи примем:

$$N_{\text{тр}} = F_{\text{тр}}V = \frac{2fT\rho\omega}{d_w \cos\alpha} \quad (2)$$

где  $F_{\text{тр}}$  – сила трения в зацеплении,  $V$  – скорость скольжения зубьев движителя,  $T$  – крутящий момент на приводном колесе движителя,  $f$  – коэффициент трения зубьев колеса и рейки в зацеплении,  $\rho$ ,  $\alpha$  – полярные радиус и угол точки контакта зубьев колеса и рейки,  $d_w$  – диаметр начальной окружности,  $\omega$  – угловая скорость вращения приводного зубчатого колеса.

Для определения работы сил трения необходимо вычислить время движения точки контакта зубьев движителя. Рассчитаем для элементарного участка

$$dt = \frac{ds}{V_s} \quad , \quad (3)$$

где  $V_s$  – скорость точки контакта вдоль  $ds$  (рис. 3).

Определим величину  $S$ , воспользовавшись рис. 3:

$$s = \frac{1}{2} \omega d_w \cos\alpha \cos^{-1}\mu \quad , \quad (4)$$

где  $\mu$  – угол между радиус-вектором  $\rho$  и касательной к линии зацепления.

Определим элементарную работу сил трения, как:

$$dA_{\text{тр}} = N_{\text{тр}} dt = \frac{4fT\rho\omega \cos\mu}{\omega d_w^2 \cos^2\alpha} ds \quad (5)$$

Проинтегрировав выражение (5), получим

$$A_{\text{тр}} = K \int_0^\alpha \frac{\rho \cos\mu}{\cos^2\alpha} ds, \quad (6)$$

где

$$K = \frac{4Tf}{d_w^2} \quad (7)$$

Но

$$ds = \sqrt{\rho^2 + (\rho')^2} d\alpha, \tag{8}$$

где  $\rho'$  – производная от полярного радиуса  $\rho$ .

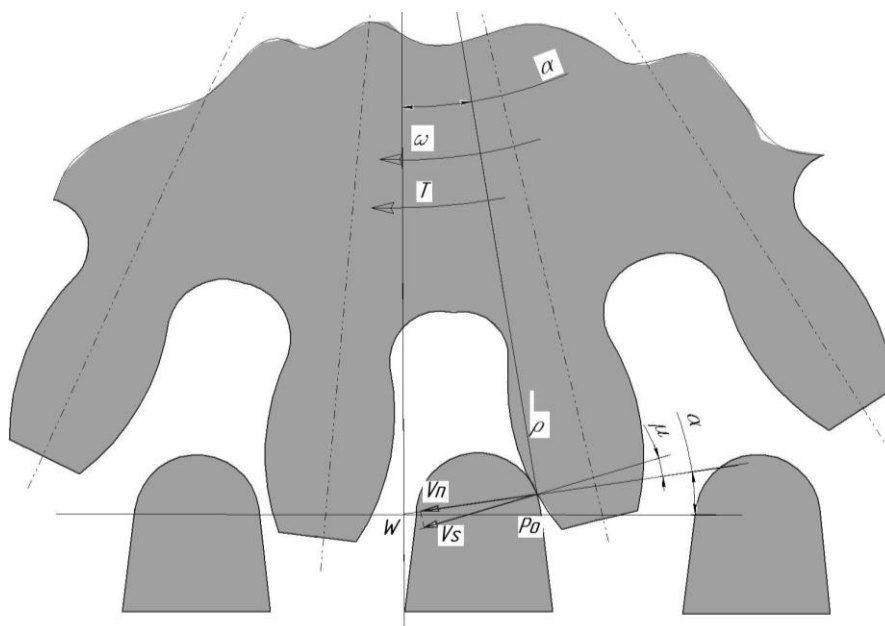


Рисунок 3. Схема кинематических параметров зацепления.

Однако, из рис. 2 определим

$$ds = \frac{d\rho}{\cos\mu} \tag{9}$$

Откуда

$$\cos\mu = \frac{d\rho}{ds} = \frac{\rho' d\alpha}{ds} \tag{10}$$

Подставив (9) в (10), получим

$$\cos\mu = \frac{\rho'}{\sqrt{\rho^2 + (\rho')^2}} \tag{11}$$

Тогда выражение (5) будет иметь вид

$$A_{тр} = K \int_0^\alpha \rho \rho' \cos^{-2} \alpha d\alpha \tag{12}$$

Для осуществления условия (1), поскольку  $K = const$ , необходимо выполнение условия:

$$\int_0^{\alpha_1} \rho \rho' \cos^{-2} \alpha d\alpha \rightarrow \min \tag{13}$$

Для определения экстремума интеграла (13) воспользуемся техникой вариационного исчисления [5]:

$$\frac{d}{d\alpha} \frac{\partial F}{\partial \rho'} - \frac{\partial F}{\partial \rho} = 0 \tag{14}$$

Здесь

$$F = \rho \rho' \cos^{-2} \alpha d\alpha \tag{15}$$



Тогда

$$\frac{2\rho \sin \alpha}{\cos^3 \alpha} + \frac{\rho'}{\cos^2 \alpha} - \frac{\rho'}{\cos^2 \alpha} = 0 \tag{16}$$

Откуда получим условие:

$$\frac{2\rho \sin \alpha}{\cos^3 \alpha} = 0 \tag{17}$$

Поскольку

$$\rho \neq 0, \tag{18}$$

то выражение (17) будет выполняться при условии:

$$\alpha = 0 \tag{19}$$

Таким образом, при однопарном зацеплении зубьев колеса и рейки движителя (по исследованиям автора коэффициент перекрытия передачи не превышает 1,1) рациональной формой линии зацепления является прямая, сонаправленная линии перемещения объекта и находящаяся в полюсе зацепления (исследования линии зацепления с учетом многопарного зацепления изложены в работе [6]).

2D поверхность зуба рейки, состоящую из фрагментов окружностей радиусами  $R_{pi}$  и отрезков прямых линий с углом наклона  $\alpha_{pi}$  (рис.4), можно описать аналитическим выражением (20):

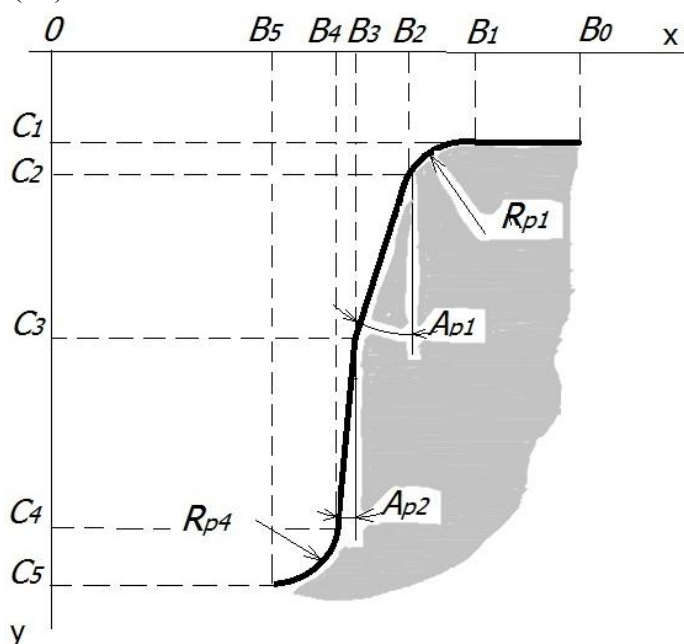


Рисунок. 4. Схема параметров профиля зуба рейки колесно-реечного движителя

Реализацией такого условия может быть прямозубый профиль или окружность (в 2D параметрах). Тогда рейка с таким профилем зубьев в 3D реализации может быть прямозубой (рис. 5 а), цевочной (рис. 5 б) или с зубьями в виде сфер [7,8,9].

$$\begin{cases} y_p = C_1, & B_0 \leq x_p < B_1 \\ (y_p - y_{poj})^2 - (x_p - x_{poj})^2 = R_{poj}^2 & C_{j-1} < y_p \leq C_j \\ y_p = C_N + (x_p - B_N) \operatorname{tg} \alpha_{pn}, & C_j < y_p \leq C_N, \quad j = 2, 3, 4 \dots n \end{cases} \quad (20)$$

Очевидно, для случая использования пары преобразования вращательного в поступательное движение посредством колёсно-реечного движителя, при высоконагруженных и динамично изменяющихся внешних условиях, целесообразно использование 3D формы зубьев рейки с прямобочными зубьями или цевками (рис. 5а) и б)). Такое решение позволит сформировать линейный контакт зубьев движителя и многократно снизить контактные напряжения, в сравнении с кромочным (точечным) контактом зубьев движителя, выполняя условие (21).

$$\sigma_k < [\sigma_k] \quad (21)$$

где  $\sigma_k$   $[\sigma_k]$  - контактные напряжения и допускаемые контактные напряжения в зубчатом зацеплении колесно-реечного движителя.

При этом, как отмечается в исследованиях [4], жёсткость конструкции цевочной рейки превосходит жёсткость конструкции рейки с зубьями.

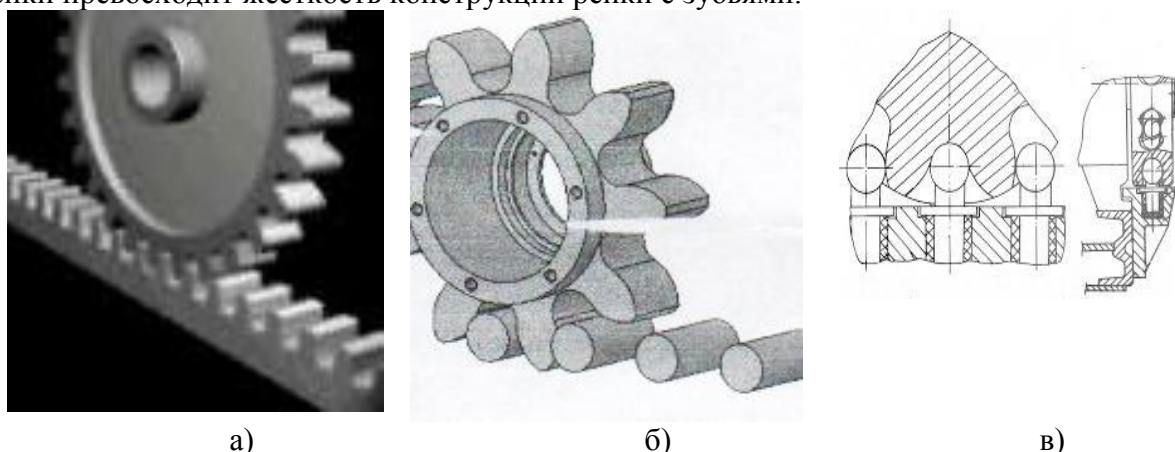


Рисунок 5. Вид колесно-реечной передачи с:  
 а) прямым профилем зубьев рейки, б) цевочными зубьями рейки; в) зубьями в виде сфер.

Для окончательного выбора наилучшей 3D формы зубьев рейки и её конструкции в целом, необходимо учитывать также технологичность конструкции и жёсткость зубчатой рейки, влияние формы зубьев приводного колеса и точности изготовления зубьев рейки на кинематические и силовые характеристики движителя, воспользовавшись рекомендациями [10].

### 3. Заключение

Определена рациональная, с точки зрения минимизации работы сил трения, форма линии зацепления и её расположение относительно объекта перемещения. Доказано, что при однопарном зацеплении зубьев колеса и рейки движителя, рациональной формой линии зацепления является прямая, сонаправленная линии перемещения объекта и находящаяся в полюсе зацепления. Разработанный подход определения рациональной формы и расположения линии зацепления позволяет определить варианты 3D формы зуба рейки колесно-реечного движителя, произвести оценку наилучшей формы зуба рейки с учетом технологичности конструкции, степени влияния точности изготов-



ления зубьев рейки на кинематические и силовые характеристики движителя и снижения контактных напряжений в зубчатом зацеплении.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Горобец, И. А. Оценка влияния параметров зацепления движителя БСП на производительность горного комбайна // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ», 2020. – № 2(69) – С. 9-15.
2. Горобец, И. А. Оптимизация профиля зубьев движителей механизма перемещения очистных комбайнов. / И. А. Горобец // Известия Вузов. Горный журнал. – М.:1992. – №5. – С. 77-81.
3. Лукиенко, Л. В. Расширение области применения электровозной откатки для горно-транспортных машин за счёт использования зубчато-реечных передач / Л. В. Лукиенко, К. В. Гальченко, И. В. Литвинов, В. В. Исаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство «Горная книга», 2017. – №9. – С. 52-59.
4. Лукиенко, Л. В. Обоснование рациональных режимов работы зубчато-реечных систем перемещения технологических машин / Л. В. Лукиенко, В. В. Исаев // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – Гомель: Издательство «Горная книга», 2014. – Вып. 8. – С. 136-148.
5. Горобец, И. А. Оптимизация линии зацепления колесно-реечной передачи / И. А. Горобец, О. Н. Новикова, В. Ю.Тихонович // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1998. – Вып. 5. – С. 40-44.
6. Новикова, О. Н. Оптимизация линии зацепления колесно-реечной передачи при многопарном зацеплении / О.Н. Новикова, И.А. Горобец, Д.К. Сергиенко// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – Вып. 7. – С. 139-146.
7. Горобец, И. А. Особенности изготовления движителей бесцепных систем подачи угольных комбайнов / И.А Горобец, О.А. Мирошниченко // Материалы одиннадцатого научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». – Таганрог: ТРТУ, 2010 – Т. 3. – С.99-108.
8. Лукиенко, Л. В. Совершенствование тяжело нагруженных зубчато-реечных систем перемещения с помощью программных продуктов НТЦ «АПИМ» / Л. В. Лукиенко, М. Каменский // САПР и графика – М.: КомпьютерПресс, 2009. – Вып. №9. – С.41-47.
9. А. с. 1191576 СССР, МПК E21C 29/02. Механизм подачи очистного комбайна / Н. Г. Бойко, В. Г. Шевцов, И. А. Горобец, В. И. Игнатов, В. Г. Нечепав, А. В. Болтян – 1985. БИ №42.
10. Гладчук, Е. А. Параметрическое моделирование технической системы неустойчивой структуры / Е. А. Гладчук // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вып. № 3(54) – С. 25-29.

Поступила в редколлегию 20.02.2021 г

**Р. М. Грубка**, д-р техн. наук, доцент  
Донецкий национальный технический университет, ДНР  
Тел./Факс: +38 (071) 3114221; E-mail: [grubka\\_roman@mail.ru](mailto:grubka_roman@mail.ru)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДА МЕЖДУ СИСТЕМАМИ КООРДИНАТ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС

*В статье представлены основные зависимости по определению параметров перехода между системами координат режущего инструмента и шестерни с пространственно-модифицированными зубьями при многокоординатной обработке цилиндрических колес. Зависимости позволяют определить положение и параметры профилирующей плоскости в пространстве в зависимости от вида и параметров траектории перемещения режущего инструмента. Использование результатов работы в рамках пространственного подхода к решению вопросов формообразования зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями на зубофрезерных операциях позволяет теоретически исследовать процессы нарезания зубчатых венцов с целью повышения геометрической точности зубьев, назначения наиболее рациональных режимных параметров обработки для непрерывно изменяющихся условий резания или определения резервов в повышении производительности процесса нарезания модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес.*

**Ключевые слова:** цилиндрическая зубчатая передача, зубчатый венец, боковая поверхность зубьев, модификация зубьев, траектория перемещения, режущий инструмент, профилирующая плоскость.

**R. M. Grubka**

## DETERMINATION OF TRANSITION PARAMETERS BETWEEN THE CUTTING TOOL AND WORKPIECE COORDINATE SYSTEMS WITH MULTI-COORDINATE CYLINDRICAL WHEELS MACHINING

*The article presents the main dependencies for determining the transition parameters between the coordinate systems of the cutting tool and gears with spatially modified teeth in multi-coordinate cylindrical wheels machining. Depending possible to determine the position and parameters of a profiling plane in space, depending on the type and parameters of the trajectory of the cutting tool. Using the results of the work within the spatial approach to solving the problems of shaping gear rims with spatially modified teeth in gear hobbing operations allows theoretically investigating the cutting gear rims processes in order to increase the teeth geometric accuracy, the appointment of the most rational processing parameters for continuously changing cutting conditions or determination of reserves in increasing the productivity of the modified cutting process toothings cylindrical wheels.*

**Keywords:** spur gear, gear ring, teeth side surface, teeth modification, copying method, displacement path, cutting tool, profiling plane

### 1. Введение

В настоящее время сдерживающим фактором для широкого применения пространственных зацеплений цилиндрических колес является отсутствие обобщенных расчетных методик для определения элементов технологического обеспечения изготовления зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями, зацепления на основе которых способны компенсировать все погрешности изготовления и монтажа, а также перемещения, вызванные деформациями в процессе эксплуатации в результате действия рабочей нагрузки [1, 2].

Технологические способы формообразования цилиндрических колес с наружными зубьями с модифицированной боковой поверхностью приведены в работе [3]. Получение теоретически точной пространственной модификации зубьев возможно при

выполнение двух условий второго способа Оливье, что практически реализуемо на операциях финишной обработки зубчатых венцов. При этом зубчатые венцы с пространственной модификацией зубьев, приближенной к заданной пространственной [4, 5], могут применяться для менее ответственных зубчатых зацеплений или быть нарезаны при черновой обработке зубчатых венцов с припуском под последующую обработку.

В процессе формообразования зубьев нарезаемый профиль без искажения воспроизводится в профилирующей плоскости, положение которой в пространстве зависит от вида траектории относительного перемещения режущего инструмента [6, 7]. В соответствии с предложенной классификацией движений [6, 7] для повышения точности изготовления зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями методом копирования режущий инструмент должен перемещаться по пространственной криволинейной траектории рис. 1. При этом происходит непрерывное изменение положения профилирующей плоскости в пространстве и смещение нарезаемого профиля зубьев в заданном направлении [8]. В связи с тем, что с применением существующего серийного оборудования и стандартного режущего инструмента, нарезается зубчатый венец с пространственной модификацией зубьев, приближенной к рассчитанной теоретически, для более близкого приближения геометрических параметров боковой поверхности зубьев к теоретически рассчитанным, необходимо найти такое положение профилирующей плоскости, чтобы минимизировать отклонения нарезаемого профиля зуба от теоретически точного во всех сечениях по ширине зубчатого венца. Достичь требуемого результата можно при постановке и решении пространственных технологических задач формообразования зубчатых венцов с пространственной модификацией зубьев, т.е. при переходе к многокоординатной обработке зубчатых венцов. Поэтому определение положения профилирующей плоскости режущего инструмента при многокоординатной обработке пространственно-модифицированных зубчатых венцов является актуальной научной задачей.

**Цель работы:** определение параметров перехода между системами координат режущего инструмента и шестерни с пространственно-модифицированными зубьями и положения профилирующей плоскости режущего инструмента в пространстве при многокоординатной обработке цилиндрических колес в зависимости от вида траектории перемещения режущего инструмента.

## 2. Основное содержание и результаты работы

На основании выше изложенного в работе [8] предложено два способа многокоординатного зубофрезерования методом копирования: обработка пальцевой и дисковой модульными фрезами (рис. 1.).

На рис. 1а представлена схема обработки зубчатого венца пальцевой модульной фрезой. Как видно из рис. 1а, с пальцевой фрезой связана подвижная система координат  $x_0y_0z_0$ , начало которой расположено на кривой  $a-a$ , определяющей траекторию перемещения режущего инструмента. Инструмент вращается вокруг оси  $O_0y_0$  с угловой скоростью  $\omega_0$  и перемещается вдоль пространственной траектории  $a-a$ . При этом непрерывно изменяется положение профилирующей плоскости  $x_0O_0y_0$ .

На рис. 1б представлена схема обработки зубчатого венца дисковой модульной фрезой. Как видно из рис. 1б, с дисковой модульной фрезой связана подвижная система координат  $x_0y_0z_0$ , начало которой расположено на пересечении плоскости симметрии фрезы и ее оси вращения. Инструмент вращается относительно оси  $O_0x_0$  с угловой скоростью  $\omega_0$ . Для удобства осуществления расчетов выбрана промежуточная подвижная система координат  $x'_0y'_0z'_0$ , которая также связана с режущим инструментом. Начало

координат  $O_0'$  промежуточной системы координат  $x_0' O_0' y_0'$  непрерывно изменяет свое местоположение, перемещаясь по пространственной траектории  $a-a$ . При этом непрерывно изменяется положение профилирующей плоскости  $x_0' O_0' y_0'$ .

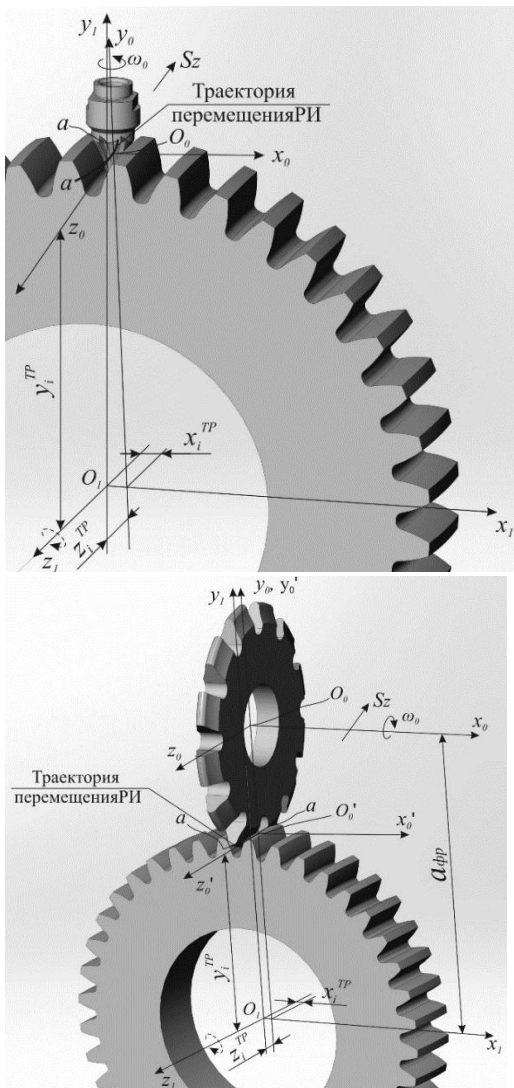


Рисунок 1. Многокоординатное зубофрезерование пространственно-модифицированных зубьев методом копирования: а - пальцевой модульной фрезой; б - дисковой модульной фрезой.

Для перехода от системы координат режущего инструмента  $S_0(x_0, y_0, z_0)$  ( $S_0'(x_0', y_0', z_0')$ ) - для дисковой модульной фрезы к системе координат шестерни  $S_1(x_1, y_1, z_1)$  необходимо выполнить (промежуточные положения осей системы координат шестерни на рис. 1. не показаны):

- перенос относительно осей абсолютной системы координат в заданную точку траектории относительного перемещения режущего инструмента с координатами  $x_i^{mp}, y_i^{mp}, z_i^{mp}$ :

$$M_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i^{mp} \\ 0 & 1 & 0 & y_i^{mp} \\ 0 & 0 & 1 & z_i^{mp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

- поворот относительно оси  $x_1^1$  на угол  $\alpha_x$ :

$$M_{\alpha_x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

- поворот относительно оси  $y_1^{11}$  на угол  $\alpha_y$ :

$$M_{\alpha_y} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_y & 0 & \sin \alpha_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Найдя произведение матриц  $M_P, M_{\alpha_x}$  и  $M_{\alpha_y}$ , получим матрицу перехода от системы координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$  к системе координат  $S_1(x_1, y_1, z_1)$ :

$$M_0 = M_P M_{\alpha_x} M_{\alpha_y} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_y & 0 & \sin \alpha_y & x_i^{mp} \\ -\sin \alpha_x \sin \alpha_y & \cos \alpha_x & \cos \alpha_y \sin \alpha_x & y_i^{mp} \\ -\cos \alpha_x \sin \alpha_y & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x \cos \alpha_y & z_i^{mp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Система уравнений для перехода от системы координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$  к системе координат  $S_1(x_1, y_1, z_1)$ :

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \cos \alpha_y x_0 + \sin \alpha_y z_0 + x_i^{mp}; \\ y_1 &= -\sin \alpha_x \sin \alpha_y x_0 + \cos \alpha_x y_0 + \cos \alpha_y \sin \alpha_x z_0 + y_i^{mp}; \\ z_1 &= -\cos \alpha_x \sin \alpha_y x_0 - \sin \alpha_x y_0 + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_0 + z_i^{mp}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Матрица перехода от системы координат  $S_I(x_1, y_1, z_1)$  к системе координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$ :

$$M_0' = (M_p M_{\alpha_x} M_{\alpha_y})^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_y & -\sin \alpha_x \sin \alpha_y & -\cos \alpha_x \sin \alpha_y & z_i^{mp} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_i^{mp} \cos \alpha_y + y_i^{mp} \sin \alpha_x \sin \alpha_y \\ 0 & \cos \alpha_x & -\sin \alpha_x & z_i^{mp} \sin \alpha_x - y_i^{mp} \cos \alpha_x \\ \sin \alpha_y & \cos \alpha_y \sin \alpha_x & \cos \alpha_x \cos \alpha_y & -x_i^{mp} \sin \alpha_y - y_i^{mp} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_i^{mp} \cos \alpha_x \cos \alpha_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Система уравнений при переходе от системы координат  $S_I(x_1, y_1, z_1)$  к системе координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$ :

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \cos \alpha_y x_1 - \sin \alpha_x \sin \alpha_y y_1 - \cos \alpha_x \sin \alpha_y z_1 + z_i^{mp} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_i^{mp} \cos \alpha_y + y_i^{mp} \sin \alpha_x \sin \alpha_y; \\ y_0 &= \cos \alpha_x y_1 - \sin \alpha_x z_1 + z_i^{mp} \sin \alpha_x - y_i^{mp} \cos \alpha_x; \\ z_0 &= \sin \alpha_y x_1 + \cos \alpha_y \sin \alpha_x y_1 + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_1 - x_i^{mp} \sin \alpha_y - y_i^{mp} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_i^{mp} \cos \alpha_x \cos \alpha_y. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В систему уравнений (7) входит пять неизвестных: координаты рассматриваемой точки в системе координат  $x_1, y_1, z_1$  и углы поворота систем координат при переходе в рассматриваемую точку на траектории относительного перемещения режущего инструмента  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$ . При решении системы задаются значениями координат точки  $x_0, y_0, z_0$  в системе режущего инструмента, например, координаты точки, принадлежащей одной из осей системы координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$ . Для решения системы (7) относительно входящих в нее неизвестных необходимо в нее добавить четвертое уравнение – уравнение профилирующей плоскости вида [9]:

$$A_{pi} \cdot x_1 + B_{pi} \cdot y_1 + C_{pi} \cdot z_1 + D_{pi} = 0, \quad (8)$$

где  $A_{pi}, B_{pi}, C_{pi}, D_{pi}$  - постоянные коэффициенты в уравнении плоскости.

После чего, полученные выражения, записываются относительно двух точек, принадлежащих осям системы координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$ . В итоге получим систему из восьми уравнений для определения параметров перехода от системы координат  $S_I(x_1, y_1, z_1)$  к системе координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$ :

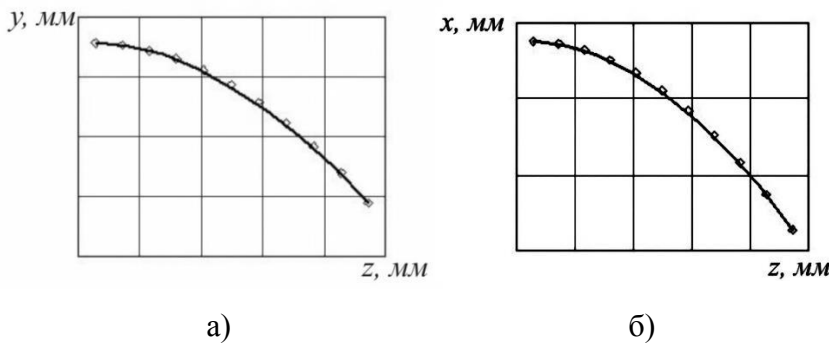
$$\left. \begin{aligned} 1 &= \cos \alpha_y x_{11} - \sin \alpha_x \sin \alpha_y y_{11} - \cos \alpha_x \sin \alpha_y z_{11} + z_i^{mp} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_i^{mp} \cos \alpha_y + y_i^{mp} \sin \alpha_x \sin \alpha_y; \\ 0 &= \cos \alpha_x y_{11} - \sin \alpha_x z_{11} + z_i^{mp} \sin \alpha_x - y_i^{mp} \cos \alpha_x; \\ 0 &= \sin \alpha_y x_{11} + \cos \alpha_y \sin \alpha_x y_{11} + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_{11} - x_i^{mp} \sin \alpha_y - y_i^{mp} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_i^{mp} \cos \alpha_x \cos \alpha_y; \\ A_{pi} \cdot x_{11} + B_{pi} \cdot y_{11} + C_{pi} \cdot z_{11} + D_{pi} &= 0 \\ 0 &= \cos \alpha_y x_{12} - \sin \alpha_x \sin \alpha_y y_{12} - \cos \alpha_x \sin \alpha_y z_{12} + z_i^{mp} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_i^{mp} \cos \alpha_y + y_i^{mp} \sin \alpha_x \sin \alpha_y; \\ 1 &= \cos \alpha_x y_{12} - \sin \alpha_x z_{12} + z_i^{mp} \sin \alpha_x - y_i^{mp} \cos \alpha_x; \\ 0 &= \sin \alpha_y x_{12} + \cos \alpha_y \sin \alpha_x y_{12} + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_{12} - x_i^{mp} \sin \alpha_y - y_i^{mp} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_i^{mp} \cos \alpha_x \cos \alpha_y; \\ A_{pi} \cdot x_{12} + B_{pi} \cdot y_{12} + C_{pi} \cdot z_{12} + D_{pi} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $x_{11}, y_{11}, z_{11}$  и  $x_{12}, y_{12}, z_{12}$  - координаты первой и второй точек, принадлежащих осям системы координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$  в системе координат  $S_1(x_1, y_1, z_1)$ .

Решив систему (9), определим значения координат точек, принадлежащих осям системы координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$  в системе координат  $S_1(x_1, y_1, z_1)$  и значения углов поворота системы координат  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  для рассматриваемой точки траектории перемещения режущего инструмента. Составив и решив системы вида (9) для нескольких точек траектории вдоль линии зуба, определим распределение параметров перехода от системы координат  $x_1y_1z_1$ , связанной с шестерней к системе координат  $x_0y_0z_0$ , связанной с режущим инструментом.

Пространственная траектория перемещения режущего инструмента рис. 2. может быть, аппроксимирована сплайном Безье третьего порядка и задана системой уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} x_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 x_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} x_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp2} x_{2mp} + \lambda_i^{mp3} x_n^{mp}; \\ y_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 y_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} y_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp2} y_{2mp} + \lambda_i^{mp3} y_n^{mp}; \\ z_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 z_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} z_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp2} z_{2mp} + \lambda_i^{mp3} z_n^{mp}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$



где  $x_0^{mp}, y_0^{mp}, z_0^{mp}$  и  $x_n^{mp}, y_n^{mp}, z_n^{mp}$  - координаты точек начала и конца траектории перемещения режущего инструмента;  $x_{1mp}, y_{1mp}, z_{1mp}$  и  $x_{2mp}, y_{2mp}, z_{2mp}$  - координаты опорных точек сплайна;  $\lambda_i^{mp}$  -  $i$  параметр сплайна.

Рисунок 2. Вид пространственной траектории относительного перемещения режущего инструмента, аппроксимированной сплайном Безье третьего порядка.

Профилирующая плоскость перпендикулярна траектории пере-

мещения режущего инструмента. Уравнение нормальной плоскости в общем виде определяется зависимостью [9]:

$$\frac{dx_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} \cdot (x_1 - x_i^{mp}) + \frac{dy_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} \cdot (y_1 - y_i^{mp}) + \frac{dz_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} \cdot (z_1 - z_i^{mp}) = 0. \quad (11)$$

Производные координат системы уравнений (10) по параметру  $\lambda_i^{mp}$  сплайна определяются по зависимостям:

$$\begin{aligned} \frac{dx_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} &= 3 \cdot \lambda_i^{mp2} x_n^{mp} - 3 \cdot \lambda_i^{mp2} x_{2mp} - 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 x_0^{mp} + 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 x_{1mp} + \\ &+ 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} x_{1mp} - 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} x_{2mp}; \\ \frac{dy_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} &= 3 \cdot \lambda_i^{mp2} y_n^{mp} - 3 \cdot \lambda_i^{mp2} y_{2mp} - 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 y_0^{mp} + 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 y_{1mp} + \\ &+ 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} y_{1mp} - 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} y_{2mp}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} = & 3 \cdot \lambda_i^{mp2} z_n^{mp} - 3 \cdot \lambda_i^{mp2} z_{2mp} - 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 z_0^{mp} + 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 z_{1mp} + \\ & + 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} z_{1mp} - 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} z_{2mp}. \end{aligned}$$

Подставив зависимости (12) в уравнение нормальной плоскости (11) и раскрыв скобки, приведем уравнение нормальной плоскости к общему виду (8), где коэффициенты при координатах  $x_I, y_I, z_I$  равны производным по соответствующим координатам  $A_{pi} = \frac{dx_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}}, B_{pi} = \frac{dy_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}}, C_{pi} = \frac{dz_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}}$  и определяются зависимостями (12), а свободный член определяется зависимостью:

$$D_{pi} = -A_{pi} x_i^{mp} - B_{pi} y_i^{mp} - C_{pi} z_i^{mp}. \quad (13)$$

Параметры перехода от системы координат  $x_I y_I z_I$  к системе координат  $x_0 y_0 z_0$  определяются для каждой точки траектории относительного перемещения режущего инструмента. При этом решаются системы уравнений вида (9). В результате решения системы уравнений (9), определяются значения координат точек, принадлежащих осям системы координат  $S_0(x_0, y_0, z_0)$  в системе координат  $S_I(x_I, y_I, z_I)$  и значения углов поворота системы координат  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$ . В последующих расчетах, по определению элементов технологического обеспечения, используются только значения углов  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$ , которые определяются в результате решения системы уравнений (9) с использованием результатов определения параметров профилирующих плоскостей (12) и (13), могут быть получены с использованием зависимостей:

$$\alpha_{xi} = \arctan \left( \frac{B_{pi}}{C_{pi}} \right); \quad (14)$$

$$\alpha_{yi} = \arctan \left( \frac{A_{pi}}{B_{pi} \sin \alpha_{xi} + C_{pi} \cos \alpha_{xi}} \right). \quad (15)$$

### 3. Выводы

В представленной работе получены основные зависимости по определению параметров перехода между системами координат режущего инструмента и шестерни с пространственно-модифицированными зубьями при многокоординатной обработке цилиндрических колес. Использование данных зависимостей позволяют определить параметры профилирующей плоскости в зависимости от параметров траектории перемещения режущего инструмента в пространстве. Это в рамках пространственного подхода к решению вопросов формообразования зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями на зубофрезерных операциях позволит:

- теоретически исследовать процессы нарезания зубчатых венцов с целью повышения геометрической точности зубьев,

- назначать наиболее рациональные режимные параметры обработки для непрерывно изменяющихся условий резания или определять резервы в повышении производительности процесса нарезания модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Грубка, Р. М. Суммарные перемещения элементов цилиндрических передач внешнего зацепления, вызванные наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформациями в процессе эксплуатации [Текст] / Р. М. Грубка, И. А. Петряева,

А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – № 1(60). – С. 19-24.

2. Грубка, Р. М. Обобщенные зависимости для пространственного соединения цилиндрических зубчатых колес, учитывающие наличие погрешностей и деформаций элементов передач [Текст] / Р. М. Грубка // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: ДонНТУ, 2018. – № 3(62). – С. 10-18.

3. Калашников, А. С. Технология изготовления зубчатых колес [Текст] / А. С. Калашников – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.

4. Грубка, Р. М. Методика определения параметров для настройки зубофрезерного станка при фрезеровании зубьев втулок зубчатых муфт с пространственной геометрией [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, С. И. Лучко // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: Донец. нац. техн. ун-т, 2011. – Вып. 41. – С. 112-118.

5. Грубка, Р. М. Фрезерование зубьев втулок муфт с геометрией приближенной к групповой пространственной методом обкатки на существующем серийном оборудовании [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, Л. Н. Феник, С. И. Лучко // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. - Донецьк: Донец. нац. техн. ун-т, 2011. – Вып. 42. – С. 98-103.

6. Грубка, Р. М. Классификация движений при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических зубчатых колес методом копирования [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, И. А. Петряева// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: ДонНТУ, 2019. – №3(66). – С. 16-21.

7. Грубка, Р. М. Классификация движений при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес методом обкатки / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, И. А. Петряева // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сб. тр. науч. Семинара / под ред. В. А. Лебедева; Донской гос. техн. ун - т. [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. – С. 240 - 247. – <https://ntb.donstu.ru/content/202091>.

8. Грубка, Р. М. Зубофрезерование методом копирования цилиндрических колес с пространственно-модифицированными зубьями / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, А. В. Стёпочкина, И. А. Гуричев // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сб. тр. науч. семинара / под ред. В.А. Лебедева [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. – С. 242 - 247.

9. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 395 с.

Поступила в редколлегию 12.02.2021 г.



УДК 621.867.2

**В. О. Гутаревич**, д-р техн. наук, доц., **В. Н. Скляр**, инж.  
Донецкий национальный технический университет, ДНР  
Тел.: +38(062)3010787; E-mail: gzt1@fimm.donntu.org

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РОЛИКОВ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

*В статье изложены причины низкой долговечности роликов ленточных конвейеров с подшипниками качения. Представлен общий вид конструкции ролика нового технического уровня с разрезной осью повышенной долговечности и рациональной технологией изготовления, обеспечивающей снижение его металлоемкости на 30%. Разработаны рекомендации по применению специальных двухрядных шарикоподшипников закрытого типа, сохраняющих смазку в течение всего срока службы конвейерного ролика.*

**Ключевые слова:** ленточный конвейер, роlikоопора, конвейерный ролик, долговечность, срок службы, технология изготовления, металлоемкость.

V. O. Gutarevich, V. N. Sklyarov

### IMPROVE THE DESIGN AND TECHNOLOGY OF BELT CONVEYOR ROLLERS

*The article describes reasons for the low durability of rollers of conveyor belts with bearings rolling. Is presented general view of roller design on new technical level with a split axis with increased durability and rational manufacturing technology, which providing decreasing in 30% metal consumption in production of roller. Developed recommendations for using of special double-row sealed ball bearings that retain lubrication over the entire conveyor life roller.*

**Keywords:** belt conveyor, roller support, conveyor roller, durability, service life, manufacturing technology, metal consumption.

#### 1. Введение

Для промышленных предприятий транспорт играет весьма важную роль, обеспечивая непрерывное перемещение предметов и средств труда между производителями и потребителями, создавая условия для постоянного и ритмичного функционирования промышленного производства. Наиболее распространенным видом непрерывного вида транспорта являются ленточные конвейеры [1].

Одним из основных элементов ленточного конвейера, в значительной мере определяющим его работоспособность, являются роlikоопоры (рис.1), состоящие из горизонтальных и наклонных роликов. Как правило, горизонтальные ролик устанавливаются посередине роlikоопоры, а наклонные – по ее бокам. На долю роlikоопор приходится до 30% первоначальной стоимости от всей конвейерной установки. Ежегодно машиностроительными заводами изготавливается примерно 10 млн. роликов и, тем не менее, потребность в роликах удовлетворяется на 65-70%. По оценкам экспертов, в настоящее время в эксплуатации на горных предприятиях находится примерно 40 млн. роликов [2].

#### 2. Анализ публикаций по теме работы

Совершенствованию конструкции роликов ленточных конвейеров посвящен ряд работ. В статьях [3...5] выполнен анализ факторов, определяющих силу сопротивления вращению роликов, исследованы силы сопротивления движению конвейерной ленты, проведено моделирование напряженно-деформированного состояния резинотканевой ленты при ее изгибе. В работе [6] приведена математическая модель сопротивления движению ленты с грузом по роlikоопорам ленточных конвейеров, которая учитывает изгиб ленты. Исследования [7...8] направлены на разработку роликов шахтных ленточ-

© Гутаревич В. О., Скляр В. Н.; 2021.

ных конвейеров повышенной долговечности и ремонтпригодности. Результаты экспериментальных исследований ленточных конвейеров в производственных условиях приведены в работе [9]. Анализ их функциональных параметров роlikоопор ленточных конвейеров выполнен в работах [10...12].

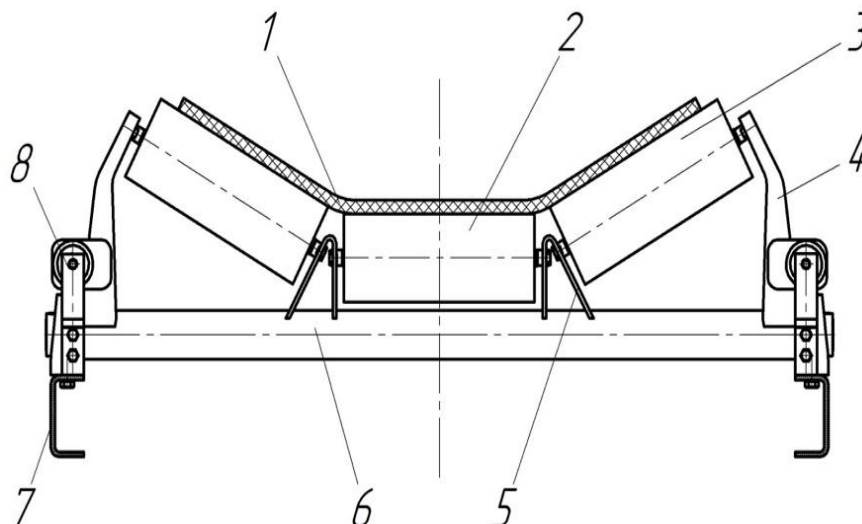


Рисунок 1. Общий вид роlikоопоры ленточного конвейера с устройством для замеров силы сопротивления движению конвейерной ленты [1]: 1 – лента; 2, 3 – средний и боковые ролики; 4, 5 – наружный и внутренний кронштейны; 6 – опорная поворотная балка; 7 – став конвейера; 8 – упор

Сравнительные испытания различных конструкций роликов, проведенные ЦНИИТМАШем и Гипроуглемашем показали, что средний срок службы роликов с шарикоподшипниками не превышает 200 часов. Были отмечены случаи выхода из строя роликов (заштыбовки) уже после 30 и даже 20 часов работы из-за попадания пыли через несовершенные лабиринтные уплотнения. На практике прекратившие вращение ролики заменяют новыми, что в итоге приносит огромный экономический ущерб предприятию. Кроме того, к недостаткам следует отнести: наличие сквозной оси и массивных стаканов увеличивает вес ролика примерно на 30%; ролик сложен в изготовлении из-за литейных и токарных операций, имеет высокую трудоемкость изготовления, сборки, а также разборки.

Настоящая статья является продолжением совершенствования конструкции и технологии изготовления роликов шахтных ленточных конвейеров.

**Цель (задачи) исследования** заключается в разработке конструкции ролика ленточного конвейера нового технического уровня с применением рациональных технологий изготовления.

Указанная цель решается выполнением следующих задач:

-анализ причин низкой долговечности роликов шахтных ленточных конвейеров с подшипниками качения;

-разработка конструкции ролика ленточного конвейера с разрезной осью уменьшенной металлоемкости с двухрядными шарикоподшипниками закрытого типа и запасом смазки на весь срок службы ролика;

- исследование деформаций и напряжений в обечайке ролика с разрезной осью с использованием 3D-модели ролика;
- разработка выводов и рекомендаций.

### 3. Основное содержание и результаты работы

Опыт практической эксплуатации показывает, что во время работы конвейера ролик нагревается и внутри его полости увеличивается давление воздуха. Во время остановки, когда ролик остывает – давление внутри его полости снижается и в подшипниковые узлы через уплотнения засасывается пыль, приводящая к заклиниванию подшипников, вызывающая прекращение вращения. Конвейерная лента, скользящая по неподвижному ролику, получает значительные повреждения обкладок и в результате чего существенно снижается ее срок службы.

Для реализации поставленной цели разработан комплект конструкторской документации на ролик с разрезной осью (рис. 2). В состав его входит моноблочная обечайка, имеющая герметичную внутреннюю полость и две внешние полости для размещения подшипниковых узлов с полуосью.

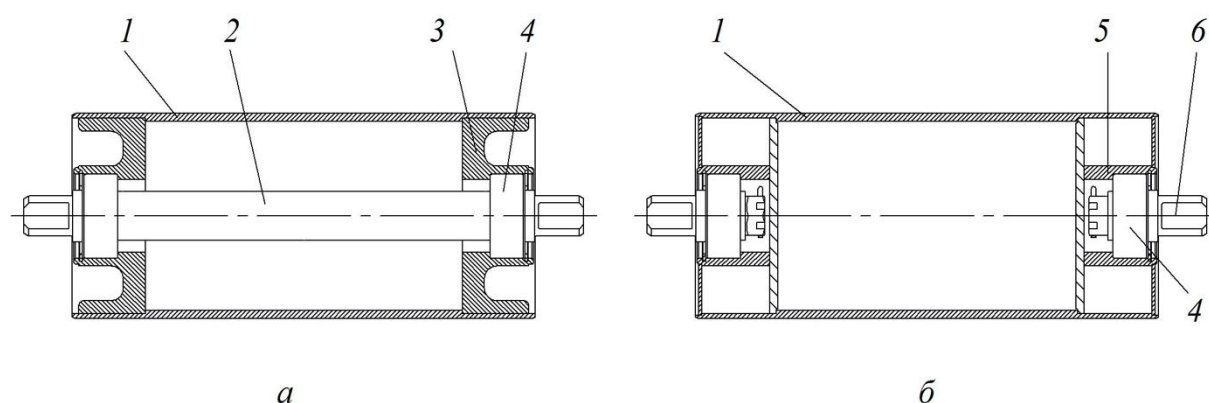


Рисунок 2. Общий вид роликов ленточного конвейера: *a* – со сплошной осью; *б* – с разрезной осью (1 – обечайка; 2 – ось; 3 – стакан; 4 – подшипник; 5 – втулка; 6 – полуось)

Полуоси подшипникового узла, установленные во внешние полости обечайки ролика, образуют разрезную ось. В каждом подшипниковом узле используется двухрядный подшипник с закрытым исполнением и со смазкой на весь период эксплуатации. Этот узел практически не имеет пустот, что предотвращает попадание пыли при засасывании воздуха из-за нагрева и остывания ролика. При этом один торец подшипников закрывается глухой крышкой, а на противоположном торце уплотнение закрывает только пространство между наружными и внутренними кольцами. Такая конструкция обеспечивает работу подшипника без смены или добавления смазки в течение всего срока службы подшипникового узла.

Для изготовления ролика выбрана обычная углеродистая сталь. Разработанный ролик, в сравнении с выпускаемым ранее, имеет все одинаковые присоединительные габаритные размеры, что обеспечивает взаимозаменяемость разных типов роликов без дополнительных изменений в конструкции роlikоопор ленточного конвейера. При этом длина двух полуосей значительно меньше длины сплошной оси, массивный стакан подшипникового узла заменен на втулку с двумя дисками, что позволяет в зависимости от ширины ленты конвейера снизить общую массу ролика на 20...30%. Такое

снижение позволяет получить годовую экономию металла свыше 50 тыс. т на перспективную программу выпуска роликов 8,3 млн. штук.

Анализ конструкции ролика с разрезной осью показывает, что трудоемкость изготовления роликов уменьшается практически в 3 раза. Это является результатом сокращения механической обработки и уменьшения отходов металла в стружку, снижения количества деталей, ликвидации целого ряда операций – отливки и обработки стаканов, предусмотренных в традиционной конструкции роликов, изготовления осей, лабиринтных уплотнений, запрессовки втулок и вальцовки торцов обечайки ролика.

Результаты моделирования напряжений в ролике с разрезной осью, проведенные в среде SolidWorks Simulation, показаны на рис. 3. Для проведения моделирования ось ролика с одной стороны закреплялась жестко, а с другой – с возможностью продольного смещения в опоре. На обечайке выделялась зона контакта ролика с конвейерной лентой. В этой зоне прикладывалась распределенная нагрузка, направленная радиально. Ее значение рассчитывалось аналитически и равнялось реакции от усилия, действующего на ролик при взаимодействии с груженой лентой конвейера. Кроме того, к торцу одной опоры ролика прикладывалась нагрузка, направленная вдоль его оси, значение которой не превышало 30% от радиальной. Это позволяло учитывать дополнительные усилия, формирующиеся при наклонной установке ролика и боковом сходе ленты со става конвейера, возникающем во время его эксплуатации.

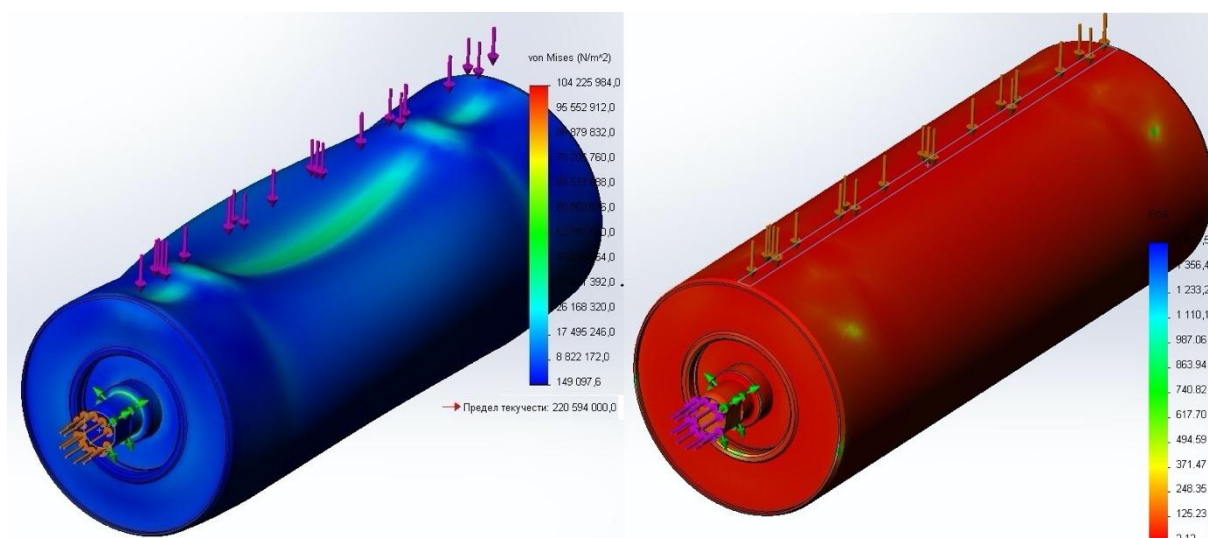


Рисунок 3. Результаты моделирования напряжений в ролике с разрезной осью:  
а – со сплошной осью; б – коэффициент запаса прочности

Из эпюры напряжений (рис. 3,а) видно, что во всех узлах расчетные значения напряжений не превышает допустимые, а минимальный запас прочности (рис. 3,б) составляет более 2,1. В общем случае прочность обечайки ролика обеспечивается и узлы ролика не требуют дополнительного упрочнения.

Изготовленный опытный образец ролика ленточного конвейера с разрезной осью прошел обкатку на токарно-револьверном станке при скорости вращения шпинделя 375 об/мин, что соответствовало окружной скорости обечайки, равной 2,5 м/с. При этом с помощью пневмоаккумулятора к обечайке прикладывалась периодическая пульсирующая нагрузка 0,85 кН, что примерно соответствовало нагрузке 1 м<sup>3</sup> угольной массы на груженой ветви ленточного конвейера.

В итоге установлено, что за счет значительного упрощения технологии изготовления, ликвидации малонадежных соединений «труба-стакан», «стакан-подшипник», а также замены пластмассовых деталей уплотнений стальными штампованными возможно увеличить долговечность конвейерного роликов. Применение специальных подшипников, отличающихся от обычных радиальных шариковых наличием двух зон уплотнений, позволяет повысить срок службы конвейерных роликов в 1,5-2,0 раза.

#### 4. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили установить.

1. В конвейерных роликах с разрезной осью за счет ликвидации сквозных осей, исключения из конструкции массивных металлических стаканов и уменьшения толщины стенок корпусов (не требуется расточка обечайки под стаканы) металлоемкость ролика снижается более чем на 30%, что позволяет получить годовую экономию металла свыше 50 тыс. т на перспективную программу выпуска роликов 8,3 млн. штук.

2. Уменьшается в 3 раза трудоемкость изготовления роликов в результате сокращения механической обработки и отходов металла в стружку, уменьшения количества деталей, ликвидации целого ряда операций – отливки и обработки стаканов, предусмотренных в традиционной конструкции роликов, изготовления осей и лабиринтных уплотнений, запрессовки втулок и вальцовки торцов обечайки ролика.

3. Долговечность роликов повышается в результате значительного упрощения технологии изготовления и обеспечения соответствия ее условиям массового производства, ликвидации малонадежных соединений «труба-стакан», «стакан-подшипник», замены пластмассовых деталей уплотнений стальными штампованными, применения высококачественных смазок длительного срока действия и существенного сокращения количества ответственных сопряжений.

4. Срок службы конвейерного ролика возможно увеличить в 1,5-2,0 раза за счет применения специальных подшипников, отличающихся от обычных радиальных шариковых наличием двух зон уплотнений. Один торец подшипников закрывается глухой крышкой, а на противоположном торце уплотнение закрывает только пространство между наружными и внутренними кольцами. Такая конструкция обеспечивает работу подшипника без смены или добавления смазки в течение всего срока службы подшипникового узла.

Применение специальных двухрядных шарикоподшипников в сочетании с рациональной технологией их установки позволяет значительно снизить трудоемкость и металлоемкость роликов, повысить их долговечность и сэкономить дополнительные производственные площади.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Расчеты и проектирование транспортных средств непрерывного действия / В. А. Будишевский, В. О. Гутаревич, В. Н. Скляр и др. под общ. ред. В. П. Кондрахина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2017. – 689 с.

2. Сидоров, Ю. П. Ролики ленточных конвейеров: Обзор / Ю. П. Сидоров. – М.: ЦНИИТЭИмаш, 1990. – 37 с.

3. Корнеев, С. В. Анализ факторов, определяющих силу сопротивления вращению роликов ленточных конвейеров / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Сборник трудов ДонГТУ. – 2013. – Вып.41. – С. 33-36.

4. Корнеев, С. В. Сопротивление движению конвейерной ленты, возникающее при прохождении роlikоопоры / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – №94. – С. 20-25.
5. Корнеев, С. В. Моделирование с применением ANSYS Workbench напряженно-деформированного состояния резинотканевой конвейерной ленты с механическим стыком при изгибе на обводных барабанах / С. В. Корнеев, В. Ю. Доброногова, В. П. Долгих, О. В. Захаров // Сборник трудов ДонГТУ. – 2020. – Вып.61. – С. 101-109.
6. Кирия, Р. В. Определение коэффициента сопротивления движению ленты по роlikоопорам конвейера, обусловленного изгибом ленты / Р. В. Кирия, В. Ю. Максютенко, Т. Ф. Мищенко // Геотехническая механика: Межведомственный сборник научных трудов. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2012. – Вып. 106. – С. 140-146.
7. Склярoв, В. Н. Разработка ролика шахтных ленточных конвейеров повышенной долговечности и ремонтпригодности / В. Н. Склярoв // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №2. – С. 194-200.
8. Склярoв, В. Н. Исследование деформаций конвейерных роликoв с разрезной осью / В. Н. Склярoв // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – № 1(15). – С. 47-50.
9. Суглобов, В. В. Экспериментальные исследования ленточных конвейеров в производственных условиях / В. В. Суглобов, П. А. Гринько // Наука и производство. – 2017. – Вып. 17. – С. 77-81.
10. Yuan, X. Q. Analysis and Design of the Roller for Belt Conveyor Based on ANSYS / X. Q. Yuan, S. Y. Yang, Q. Y. Niu // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol.1027. – P. 315- 319.
11. Furmanik, K. J. Analysis of Load Application on Idler Roller Bearing of Belt Conveyor in Different Dynamic Models / K. J. Furmanik // Journal of Friction and Wear. – 2009. – Vol.30. – Iss.2. – P. 142-147.
12. Fedorko, G. The Calculation of Force Effects of a Conveyor Belt of the Pipe Conveyor to Forming Rollers by FEM / G. Fedorko, V. Molnár, P. Michalik // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 806. – P. 181-186.

Поступила в редколлегию 24.01.2021 г.

УДК 621.85.05-034

**С. Д. Казарян**, канд. техн. наук, **М. Г. Арутюнян**, канд. техн. наук, доцент,  
**Н. Б. Закарян**, канд. техн. наук, ассистент, **Ю. Л. Саргсян**, д-р техн. наук, проф.,  
Национальный Политехнический Университет Армении, НПУА, Ереван, Армения  
Тел./Факс: +374 (099) 240799; E-mail: [sarik.ghazaryan@polytechnic.am](mailto:sarik.ghazaryan@polytechnic.am)

## ПОРТАТИВНОЕ ПАССИВНО УРАВНОВЕШЕННОЕ АССИСТИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ИНДУСТРИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*В статье изложена концепция проектирования статически уравновешенного реконфигурируемого ассистирующего устройства промышленного назначения. Приведена конструктивная схема, показаны возможности устройства. Портативность и компактность устройства достигнуты путем оптимизации конструкции и избирательности выполняемых задач, что расширяет возможности проектируемого устройства. Предложенная концепция устройства, обеспечивающая выполнение ассистирования двигательной системе верхних конечностей человека, может быть применена для проектирования экзоскелетов как промышленного, так и бытового, медицинского и военного назначения. Более того, примененный метод статического пружинного уравновешивания универсален и может быть использован при проектировании не только ассистирующих, но и подобных манипуляционных устройств с рычажными качающимися звеньями.*

**Ключевые слова:** ассистирующее устройство, статическое уравновешивание, экзоскелетон, пружина,

**S. D. Ghazaryan, M. G. Harutyunyan, N. B. Zakaryan, Yu. L. Sargsyan**

### PORTABLE PASSIVE BALANCED ASSISTIVE DEVICE FOR INDUSTRIAL PURPOSE

*The article describes the designing concept of a statically balanced reconfigurable assistive device for industrial purposes. A constructive schema is given; capabilities of the device are shown. The portability and compactness of the device are achieved by optimizing the design and selectivity of the task performing, which expands the capabilities of the designed device.*

*The proposed concept of the device, which provides assistance to the locomotors system of the upper limbs of a person, can be used to design exoskeletons for industrial, as well as for and household, medical and military purposes. Moreover, the applied method of static spring balancing is universal and can be used in the design of not only assistive but also similar manipulation devices with swinging lever links.*

**Keywords:** assistive device, static balancing, exoskeleton, spring,

### 1. Введение

За последние десятилетия существенно прогрессировало не только проектирование ассистирующих устройств, таких как экзоскелетоны и подвижные ортезы применяемые в медицине и здравоохранении и предназначенные для поддержания и реабилитации функций опорно-двигательной системы человека, но их диверсификация в отраслях индустрии, обороны и космонавтики. Предложенные разработки реально позволяют человеку не только усиливать опорно-двигательные функции, но и расширять и умножать его возможности. С силовой точки зрения современные экзоскелетоны разделяются на два типа: пассивные и активные. Первые не имеют источников питания и работают благодаря усилиям оператора. Активные же конструкции функционируют за счет дополнительных двигателей и актуаторов. Экзоскелетоны условно можно также разделить на «локальные» и «общие». Первые не берут на себя физическую нагрузку, а распределяют ее по телу пользователя, а вторые имеют упор на земле, за счет чего позволяют человеку поднимать большие тяжести (рис. 1).





Рисунок 1. Ассистирующие устройства промышленного назначения: а и б - с распределением масс на спину («локальные»), в и г - с упором на землю («общие»).

С точки зрения механики рассматриваемые ассистирующие устройства представляют собой рычажные механизмы [1-16], с действующими на звенья гравитационными нагрузками, уравнивание которых важно как при проектировании, так и эксплуатации этих устройств. Авторами предложен ряд уравновешенных устройств-ассистентов ходьбы [7,8], приседания [9], а также ходьбы и приседания [10-16], в которых использованы пружины растяжения, по причине их беспорной эффективности при решении подобных задач. [6-16].

В настоящей статье предложена новая схема реконфигурируемого портативного пассивно-уравновешенного устройства, предназначенного для удержания тяжелых и неудобных предметов и инструментов в нужном положении (рис. 2). В нем использованы телескопические звенья для регулировки геометрии устройства, а также цилиндрические пружины и механизмы регулировки силовых характеристик для удобства использования устройства (см. рис. 2).

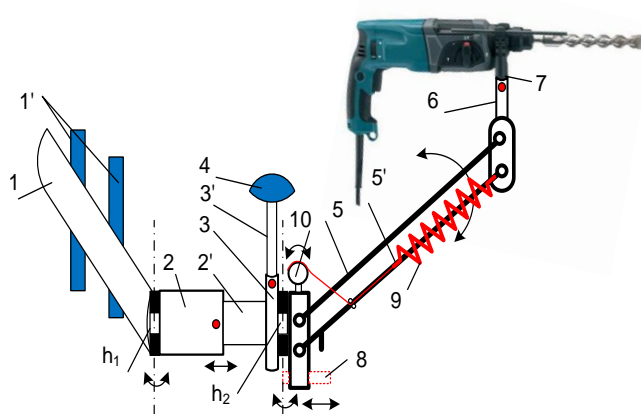


Рисунок 2. Ассистирующее реконфигурируемое устройство промышленного назначения для верхней конечности человека.

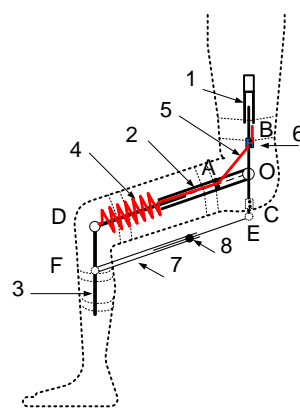


Рисунок 3. Ассистирующее реконфигурируемое устройство медицинского назначения для нижней конечности человека.



Подобная локальная схема может быть интегрирована с одной из схем устройств ассистирования нижних конечностей ранее спроектированных авторами (рис. 3) [13,14], для создания нового общего экзоскелетона.

Интегрирование подвижных локальных ортезов для ходьбы или приседания человека ранее позволило авторам предложить универсальные и уникальные схемы общих экзоскелетонов для ходьбы и приседания человека, его фиксации в положении стоя, а также и тренажеров для мышц системы локомоции человека [12-14, 16].

## 2. Ассистирующее реконфигурируемое устройство: экзоскелетон-опора

Разработана конструктивная схема реконфигурируемого устройства-ассистента для поддержания руки, с небольшими массами, либо инструментов (рис. 4).

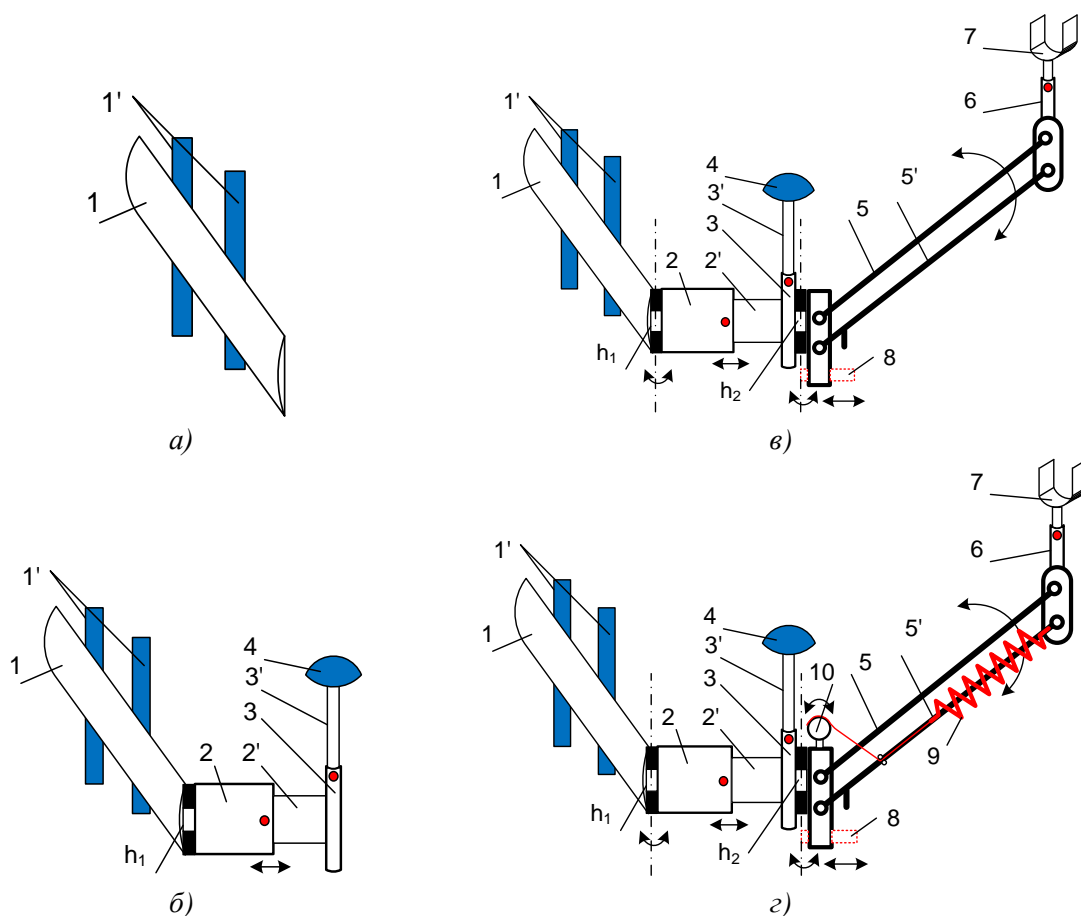


Рисунок 4. Ассистирующее реконфигурируемое устройство для распределения добавочных масс на спину оператора:

а - поясничная опора, б - боковая и локтевая опоры, в - система «3-я рука», г - уравнивание системы.

Поясничное жесткое звено 1 с подушками распределения веса 1' крепятся на пояснице оператора при помощи ремня и/или жилет-корсета (см. рис. 4а). После, на поясничное жесткое звено 1 справа для правой, или слева для левой, посредством петли  $h_1$ , крепятся телескопические звенья: 2-2' - горизонтально (боковая опора) и 3-3' - вертикально (локтевая опора) (см. рис. 4б). На звено 3' насаживается локтевая подушка 4.

Такая опорная конструкция имеет право на индивидуальное существование, и может найти применение не только в индустрии, но также в военном деле для поддержания руки и оружия либо амуниции и, также, в медицине для поддержания травмированной или прооперированной руки.

В отличие от похожих носимых экзоскелетов (см. рис. 1), при необходимости, предплечье легко можно снять с локтевой опоры, освободившись от необходимости ассистирования.

Если к боковой опоре, посредством петли  $h_2$ , закрепить пантограф 5, который, в свою очередь тоже может быть телескопическим, с регулируемым телескопическим звеном 6, то можно реконфигурировать систему (см. рис. 4в). На звене 6 могут быть закреплены различные насадки-захваты, спроектированные для требуемого назначения.

Способы уравнивания пантографа цилиндрическими пружинами (см. рис. 4г) представлялись авторами в опубликованных ранее работах [13,14]. Пантограф может уравновешенно качаться в диапазоне угла  $\varphi \in [0^\circ; 180^\circ]$ , при необходимости можно лимитировать его опущение при помощи фиксатора 8.

В устройстве используется соединение линейной цилиндрической пружины растяжения ненулевой начальной длины 9 [6-8] при помощи троса с роликовым регулятором предварительного натяжения пружины 10 [11,12,14,16]. Такое соединение позволяет варьировать силовые характеристики уравнивающей пружины и добиться точного статического уравнивания системы.

### 3. Заключение

Предложена новая реконфигурируемая схема портативного экзоскелетона опоры пассивно уравновешенного линейной цилиндрической пружины растяжения (локально), ориентированного на поддержание тяжелых и неудобных предметов и инструментов в требуемом положении или диапазоне. Показаны ее преимущества, недостатки и перспективы развития.

Для регулировки геометрии устройства, использованы телескопические звенья, а для силовой регулировки уравновешенности и удобного использования устройства, применены цилиндрические пружины и механизмы регулировки их силовых характеристик. Использование в конструкции цилиндрической пружины растяжения обеспечивает возможность реализации точной статической уравновешенности системы при работе.

По сравнению с существующими экзоскелетами, такая схема не требует жесткой фиксации конечности человека к ассистирующему механизму. В дальнейшем будут представлены также конструктивные решения с более компактной конструкцией, позволяющие складывать устройство за спиной.

Предложенная концепция проектирования устройства, обеспечивающего выполнение ассистирования опорно-двигательной системе человека, может быть применена как для проектирования экзоскелетов промышленного назначения, так и проектирования экзоскелетов бытового, медицинского и военного назначений. Более того, примененный метод статического пружинного уравнивания универсален и может быть использован при проектировании не только ассистирующих, но и подобных манипуляционных устройств с рычажными качающимися звеньями.

Основными преимуществами разработанных устройств являются их универсальность, компактность, регулируемость и комфортность, а также, обеспечение реконфигурируемости и регулируемости уравнивания и диапазонов угловых перемещений.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Экзоскелет X-RISE. <https://exoskeletonreport.com/product/x-rise/>.
2. Экзоскелет SuitX ShoulderX <https://www.suitx.com/shoulderx>.
3. Экзоскелет SuitX MAX <http://www.suitx.com/max-modular-agile-exoskeleton>.
4. Экзоскелет SuitX LegX <https://www.suitx.com/legx>.
5. Экзоскелет SuitX BackX <https://www.suitx.com/backx>.
6. Agrawal Sunil K., Fattah Abbas. Gravity Balancing of a Human Leg using an External Orthosis // IEEE International Conference on Robotics and Automation.-Roma, Italy, 10-14 April, 2007. – P. 3755-3760.
7. Arakelian V., Ghazaryan S. Gravity balancing of the human leg taking into account the spring mass. Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), Brussels, Belgium, 12-14 September 2006. – P. 630-635.
8. Arakelian V., Ghazaryan S. Improvement of balancing accuracy of robotic systems: Application to leg orthosis for rehabilitation devices // International Journal of Mechanism and Machine Theory, Elsevier. – 2008. – 43(5). – P. 565-575.
9. Казарян, С.Д. Проектирование экзоскелетона-ассистента приседания и вставания человека / С.Д. Казарян, С.А. Саргсян, В.Г. Аракелян, М.Г. Арутюнян // Известия Национальной Академии Наук Армении и ГИУА (Политехник). – Ереван, Армения, 2011. – LXIV. – №2. – С. 121-128.
10. Арутюнян, М.Г. Уравновешивание экзоскелетона-ассистента ходьбы и приседания / Арутюнян М.Г., Казарян С.Д., Саргсян С.А., Аракелян В.А. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2011 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Т. 4. – С 37-40.
11. Казарян, С.Д. Разработка портативного ортеза для ходьбы и приседания человека / Казарян С.Д., Арутюнян М.Г. // Вестник НПУА. Сборник научных статей. – Ереван, 2018. – N2. – С. 435-439.
12. Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G. The Design of Multi-purpose Portable Movable Orthosis // ROMANSY 2018. 22nd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, June 25-28, 2018, Rennes, France. – P. 296-303.
13. Zakaryan N.B., Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G., Sargsyan Yu. L., Shahinyan S.S., Shahazizyan B.H., Multi-purpose exoskeleton / Invention patent N 3299 A. – 12.02.2019.
14. Ghazaryan S.D, Harutyunyan M.G., Zakaryan N. B., Arakelian V. Design Concepts for Human Walking and Sitting Wearable Exoskeletons // Intelligent Technologies in Robotics October 21-23,2019, Moscow, Russia. pp. 63-71.
15. Ghazaryan S.D., Harutyunyan M.G., Arakelian V.H. Actual aspects of manipulation mechanism's swinging links spring balancing // XXVI International Scientific and Technical Conference "Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI Century", September 23-29, 2019, Sevastopol, – P. 450-454.
16. Казарян, С. Д. Развитие методов уравновешивания биомеханических систем применительно к проектированию реконфигурируемых экзоскелетонов-ассистентов с улучшенными функциональными характеристиками / С.Д. Казарян, Н.Б. Закарян, М.Г. Арутюнян, Ю.Л. Саргсян, С.В. Верлинский // Вестник НПУА. Механика, Машиноведение, Машиностроение. – Ереван, 2020. – №1. – С. 55-68.

Поступила в редколлегию 15.02.2021 г.

УДК 624.04:531.391.3

**М. Н. Кирсанов**, д-р физ.-мат. наук, **Сунь Цзясюань**, студент  
Национальный исследовательский университет "МЭИ"  
Тел. +7(495)362-73-14; E-mail: c216@ya.ru

## НИЖНЯЯ ГРАНИЦА ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛИ ФЕРМЫ МАНИПУЛЯТОРА

*Ферма манипулятора, рассчитанного на динамические нагрузки, представляет собой плоскую статически определимую конструкцию с массами, распределенными по узлам консоли. Предлагается алгоритм вывода зависимости первой частоты колебаний конструкции от числа панелей в аналитической форме. Используются операторы системы символьной математики Maple и метод индукции по двум параметрам фермы: числу панелей в консоли и числу панелей в вертикальной опорной стойке - ферме. Коэффициенты искомого формулы находятся как общие члены последовательностей коэффициентов, полученных в результате решения серии задач с увеличивающимся числом панелей в ферме. Используется формула Донкерлея. Решение имеет высокую точность. Для сравнения использовался традиционный численный метод решения задачи.*

**Ключевые слова:** консоль, ферма, метод Донкерлея, колебания, первая частота

**M. N. Kirsanov, Sun Jiaxuan**

## LOWER BOUND OF THE NATURAL OSCILLATION FREQUENCY OF THE MANIPULATOR TRUSS CONSOLE

*The truss of a manipulator designed for dynamic loads is a flat, statically determinate structure with masses distributed over the console nodes. An algorithm is proposed for deriving the dependence of the first oscillation frequency of the structure on the number of panels in an analytical form. The operators of the Maple symbolic mathematics system and the induction method are used for two parameters of the truss: the number of panels in the console and the number of panels in the vertical support rack-truss. The coefficients of the desired formula are found as common terms of the sequences of coefficients obtained as a result of solving a series of problems with an increasing number of panels in the truss. The formula of Dunkerley is used. The solution has high accuracy. For comparison, the traditional numerical method of solving the problem is used.*

**Keywords:** console, truss, Dunkerley method, oscillations, first frequency

### 1. Introduction

The calculation of the natural oscillations frequencies for manipulators designed for high-speed work with high overloads and stresses of individual parts is of great importance. If the design of the manipulator truss contains many elements, then the calculation of the entire spectrum of oscillations becomes quite difficult. Numerical methods in such cases tend to accumulate rounding errors, which sometimes leads to unpredictable results. In fact, the entire spectrum for practice does not always need to be calculated. The main value here is the first, lowest frequency. To calculate the lower bound of this quantity, the Dunkerley method is known, which actually replaces the complex problem of the eigenvalues of a matrix (sometimes of very large dimension) with a simple calculation of its trace. This problem can also be solved analytically. In this paper, this method is used to derive a formula for the frequency of the plane model of the manipulator.

The solution is based on the method previously used in determining analytical expressions for the deflection of trusses [1]. The problems of determining the oscillation frequencies of beam trusses were solved in the Maple system in [2–5].

### 2. Dunkerley's approximation

The truss consists of a vertical (support) part with  $m$  panels in height and a console with masses fixed in the nodes (Fig. 1). The forces in the truss rods required to calculate the

rigidity of the structure using the Mohr's integral are calculated in analytical form according to the program [1], written in the language of symbolic mathematics Maple.

To do this, the coordinates of the nodes and the grid diagram are entered into the program. The scheme is encoded by special lists N[i] containing the numbers of the ends of the rods. The rods and nodes are numbered (Fig. 2).

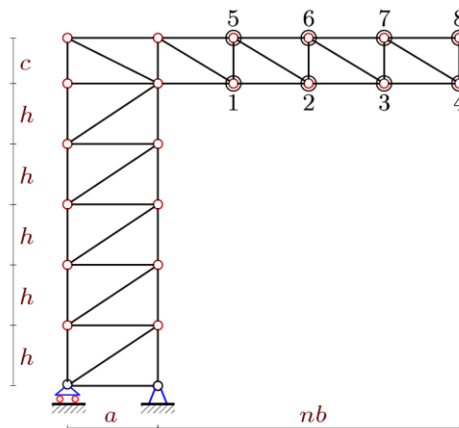


Figure 1. Truss,  $m=5, n=4$

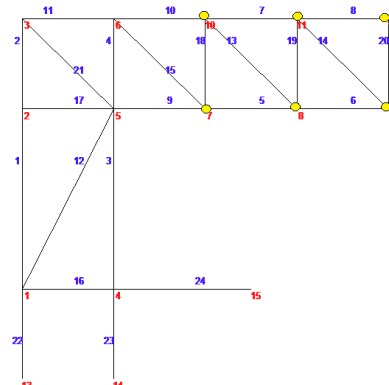


Figure 2. Numbering of nodes and rods,  $m=2, n=3$ .

Here is a fragment of the data entry program. The origin is placed in the leftmovable support:

```
H:=m*h-h+c:
for i to m do  x[i]:=0:x[i+m+1]:=a:
                y[i]:=h*i-h;y[i+m+1]:=h*i-h; end:
x[m+1]:=0:  y[m+1]:=H: x[2*m+2]:=a: y[2*m+2]:=H:
for i to n do  x[i+2*m+2]:=i*b+a;  y[i+2*m+2]:=H-c;
                x[i+2*m+n+2]:=i*b+a; y[i+2*m+n+2]:=H;  end:
```

Next, we consider the case  $a=b$ . The rods of the support posts are entered in two lists:

```
for i to m do
  N[i]:=[i,i+1]; N[i+m]:=[i+m+1,i+m+2];
end:
```

The total number of rods in the truss is  $\eta = 4(m+n+1)$  rods, including three rods that model supports. The number of degrees of freedom of the system under the assumption that the masses move only vertically is  $K=2n$ . The solution according to the Dunkerley method [7] for the first oscillation frequency is expressed in terms of the oscillation frequencies of individual loads:

$$\omega_D = \sqrt{1 / \sum_{p=1}^K 1 / \omega_p^2}, \tag{1}$$

where  $\omega_p$  is the oscillation frequency of the mass  $\mu$  located in the console node. The equation of the motion of a single mass has the form:

$$\mu \ddot{y}_p + d_p y_p = 0, p=1, \dots, K,$$

where is  $d_p$  the stiffness coefficient  $y_p$  – is the mass displacement, and  $\ddot{y}_p$  is the acceleration. Hence, the oscillation frequency of a single load (partial frequency) has the form:  $\omega_p = \sqrt{d_p / \mu}$ . The coefficient of rigidity is calculated using the Mohr integral:

$$\delta_p = 1/d_p = \sum_{j=1}^{n-3} (\tilde{S}_j^{(p)})^2 l_j / (EF).$$

Here it is indicated:  $\tilde{S}_j^{(p)}$  — the forces in the rod with the number  $j$  from the action of a single vertical force applied to the node where the mass with the number  $p$  is located,  $E$  – the elastic modulus of the rod material,  $F$  — the cross-sectional area of the rods. The cross sections and the material of the rods (except for the three supporting ones) are assumed to be the same for the entire truss. From (1) follows:

$$\omega_D^{-2} = \mu \sum_{p=1}^K \delta_p = \mu \Delta_n. \tag{2}$$

General view of the solution for the coefficient  $\Delta_n$  at  $m = 3$ :

$$\Delta_n = \frac{C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 d^3 + C_4 c^2 h}{c^2 EF}. \tag{3}$$

Solving the problem sequentially for  $n = 1, 2, 3, \dots$ , we get:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= (4a^3 + 5c^3 + 20c^2h + 4d^3) / (c^2 EF), \\ \Delta_2 &= 2(12a^3 + 9c^3 + 36c^2h + 8d^3) / (h^2 EF), \\ \Delta_3 &= (80a^3 + 43c^3 + 172c^2h + 40d^3) / (h^2 EF), \\ \Delta_4 &= 4(50a^3 + 21c^3 + 84c^2h + 20d^3) / (h^2 EF), \dots \end{aligned}$$

To generalize these expressions to  $n$ , we use the **rgf\_findrecur** operator from the special package **genfunc** of the Maple system. Thus, we obtain the recurrent equations for the elements of the sequences. For the coefficient  $C_1$ , for example, we have a linear homogeneous equation of the fifth order:  $C_{1,n} = 5C_{1,n-1} - 10C_{1,n-2} + 10C_{1,n-3} - 5C_{1,n-4} + C_{1,n-5}$ . The **rsolve** operator gives a solution to this equation:

$$C_1 = (n+1)^2(n+2) / 3.$$

Other coefficients are found in the same way:

$$\begin{aligned} C_2 &= n(7n^2 + 6n + 7) / 3, \\ C_3 &= 2n(n+1)(n+2) / 3, \\ C_4 &= 4n(2n^2 + 6n + 7) / 3. \end{aligned}$$

The task contains two independent integer-valued parameter. To generalize the solution to an arbitrary number of panels in height  $m$ , you need to repeat the entire solution sequentially for different  $m = 1, 2, \dots$ . Calculations show that only the coefficient  $C_4$  depends on

the number of panels  $m$ . By induction, using the **rgf\_findrecur** and **rsolve** operators, we obtain in the general case:

$$C_{4,n} = 2(m-1)n(2n^2 + 6n + 7) / 3.$$

Hence, taking into account (2) and (3), we obtain the final formula for the lower bound of the first natural frequency of oscillations of the truss:

$$\omega_D = c \sqrt{\frac{EF}{C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 d^3 + C_4 c^2 h}}. \quad (4)$$

### 3. Numerical verification

The accuracy of the obtained formula can be estimated by comparing it with a full-scale numerical calculation of all frequencies of the structure. The forces calculation can be performed in the same program that was used to calculate the forces in the analytical form.

The equations of mass  $\mu$  motion have the form:

$$\mu \mathbf{I}_K \ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{D}_K \mathbf{Y} = 0,$$

Here the following symbols are introduced:  $\mathbf{D}_K$  – stiffness matrix,  $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_K]^T$  – vector of vertical displacements of loads,  $\mathbf{I}_K$  – unit matrix,  $\ddot{\mathbf{Y}}$  – vector of accelerations of nodes with masses  $\mu$ . The stiffness matrix  $\mathbf{D}_K$  is calculated as the inverse of the flexibility matrix  $\mathbf{B}_K$ , whose elements are determined using the Mohr's integral:

$$b_{i,j} = \sum_{p=1}^{n-3} S_p^{(i)} S_p^{(j)} l_p / (EF). \quad (5)$$

Here  $S_p^{(i)}$  — the force in the rod with the number  $p$  from the action of the unit vertical force at the node  $i$ ,  $l_p$  — the length of the rod. The three rods in the supports are not deformed. The forces in these rods are not included in the sum (5).

The eigenvalues of the matrix  $\mathbf{B}_K$  are found using the **Eigenvalues** operator from the specialized linear algebra package **LinearAlgebra** of the Maple system. The graph (Fig. 3) shows the curves of the dependence of the first frequency  $\omega_{num}$ , obtained numerically, and  $\omega_D$  according to the formula (4). The curve of the analytical solution according to Dunkerley is located slightly below the numerical solution, the curves are almost identical. Accepted:  $m = 3$ ,  $EF = 1000H$ ,  $\mu = 100\text{kg}$ ,  $a = 3\text{m}$ ,  $h = 5\text{m}$ . To clarify the nature of the relative error, you can trace the dependence of the value  $\varepsilon = (\omega_{num} - \omega_D) / \omega_{num}$  from the number of panels.

The error of the solution varies depending on the number of panels from 0.92% for  $n = 2$  to 0.68% for a large number of panels (Fig. 4).

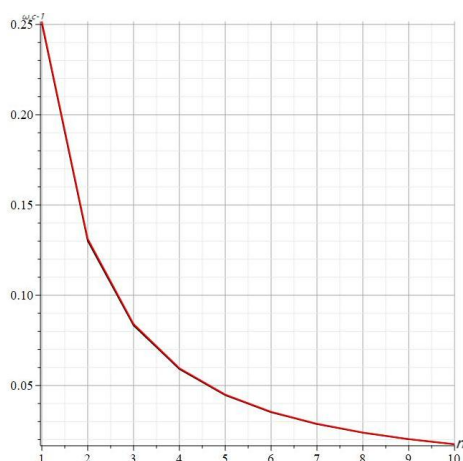


Figure 3. Dependence of the first frequency on the number of panels.

The resulting formula can be used to estimate the frequency of oscillations of the truss with a very large number of rods. As is known, the accuracy of the numerical calculation decreases with an increase in the number of structural elements, while the analytical solution at  $n > 10$  has an almost constant and high accuracy.

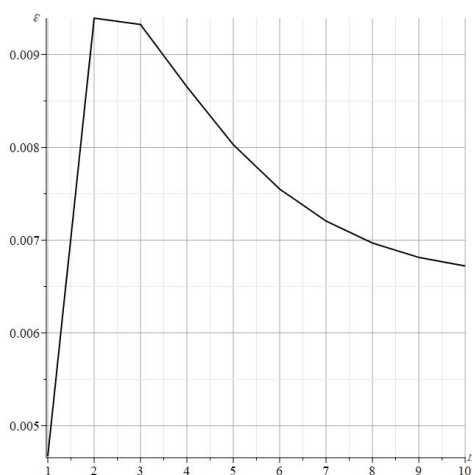


Figure 4. The error estimation of Dunkerley depending on the number of panels.

Numerical calculations and calculations using the formula (4) show that the oscillation frequency depends non-linearly on the height of the panel  $h$  (Fig. 5). The graphs are constructed according to the analytical solution (4) for  $m = 8$  and the same values of the masses and stiffness of the rods as the previous graphs. As the number of  $n$  panels in the console increases, the extremum on the chart decreases and shifts to the right on the chart.

#### 4. Conclusions

The method of estimating the first frequency by Dunkerley in the problems of analyzing the vibration frequencies of structures is rarely used in practice. This is due to the fact that for systems with a small number of degrees of freedom, its accuracy is low (29% according to [6]), and in the case of systems with a large number of degrees of freedom, numerical counting is necessary for its use, and the meaning of using the Dunkerley method is lost. Numerically, it is not difficult to calculate with sufficient accuracy all the frequencies of natural oscillations.



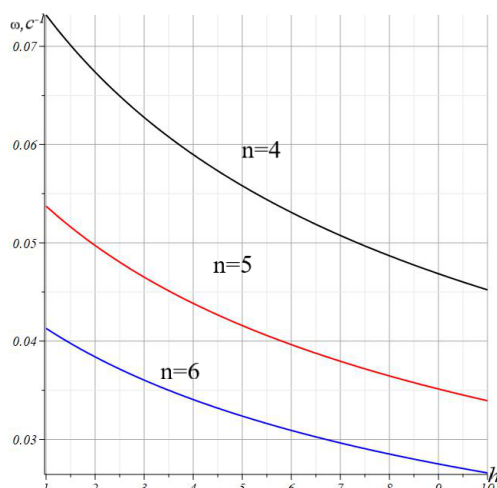


Figure 5. Dependence of the oscillation frequency on the height of the truss.

In this paper, the method of induction by two independent parameters for the derivation of analytical dependencies and the use of symbolic mathematics operators allowed us to obtain an analytical solution. As it turned out, the frequency dependence on the number of panels has a fairly compact shape and high accuracy. The formula is convenient for use in practical calculations, and the applied algorithm can be used in solving other similar problems for regular systems.

The investigation was carried out within the framework of the project “Dynamics of light rod structures of manipulators” with the support of a grant from NRU "MPEI" for implementation of scientific research programs "Energy", "Electronics, Radio Engineering and IT", and “Industry 4.0, Technologies for Industry and Robotics in 2020-2022” and supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow University «Fundamental and Applied Space Research».

#### REFERENCES:

1. Kirsanov, M. N. Trussed Frames and Arches: Schemes and Formulas / M. N. Kirsanov – Cambridge Scholars Publishing. UK. 2020.
2. Kirsanov, M. N., Tinkov, D. V. Analysis of vibration frequencies of cargo depending on its position in the nodes of a planar truss. Construction and Reconstruction. – 2020. – № 1(87). – Pp. 14–19.
3. Zaborskaya, N. V. On the dependence of the frequency of vibrations of the cargo on its location on the truss/ In the book: Radioelectronics, Electrical Engineering and Power Engineering topics of reports of the 22nd International Scientific and Technical Conference of Students and Aspirants: in 3 volumes. 2016. – p. 244.
4. Vorobev, O. Bilateral analytical estimation of first frequency of a plane truss. Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 92. Article No 9204. – doi: 10.18720/CUBS.92.4
5. Petrichenko, E. A. The lower bound of the frequency of natural oscillations of the Fink truss. Structural mechanics and structures. 2020. – No.3 (26). – Pp. 21–29.
6. Yablonsky, A. A. Kurs teorii kolebanii [Course of the theory of oscillations]. – Moscow. Higher School, 1975. – 248 p.

Поступила в редколлегию 06.02.2021 г.

УДК 621.01

<sup>1</sup>А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., <sup>2</sup>Б. С. Котляров, канд. техн. наук<sup>3</sup>В. Б. Котляров, инженер, <sup>2</sup>С. Б. Котляров, инженер<sup>1</sup>ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР<sup>2</sup>Москва, Россия, <sup>3</sup>Ялта, Россия

Тел: +38(071) 3060879; +7(985) 021-79-06, +7(964) 70-45-362

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org); [boris.kotlyarov@mail.ru](mailto:boris.kotlyarov@mail.ru); [velidarkotlarov@mail.ru](mailto:velidarkotlarov@mail.ru)

## СИНТЕЗ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ И ФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ КПП

В данной статье представлен подход к созданию функционально-ориентированных технологий на основе синтеза структурных схем технологического воздействия на зоны, участки и части деталей машиностроительного назначения. Базой для разработки схем функционально-ориентированных технологических воздействий в процессе изготовления деталей является поиск и нахождение в итеративно-рекуррентном цикле оптимальных способов взаимодействия инструментов с преобразуемыми частями, участками и зонами деталей на всех уровнях глубины технологии, обеспечивающих реализацию заложенных при их проектировании конструктивных функций. Для этого конструктивным функциям детали приведены в соответствие технологические функции комплекса станок – среда – оснастка – инструмент – деталь на всех уровнях проявления и взаимодействия.

**Ключевые слова:** деталь, часть, участок, зона, функция, совокупность свойств, функциональные признаки, технология, технологическое воздействие;

A. N. Mikhaylov, B.S. Kotlyarov, V. B. Kotliarov, S. B. Kotliarov

## SYNTHESIS OF STRUCTURAL DIAGRAMS OF FUNCTIONALLY-ORIENTED TECHNOLOGICAL IMPACT IN THE FORMATION AND FORMATION OF SURFACE PROPERTIES OF THE PARTS

This article presents an approach to creating functional-oriented technologies based on the synthesis of structural schemes of technological impact on zones, sections and parts of machine-building parts. The basis for the design of functionally-oriented technological effects in the manufacturing process of parts is finding in an iterative, recursive cycle of optimal ways of interaction instruments convertible parts, portions and areas of the parts at all depth levels, technologies that enable the realization of the mortgaged when designing their structural function. To do this, the structural functions of the part are aligned with the technological functions of the machine – environment – tooling – tool – part complex at all levels of manifestation and interaction.

**Keywords:** detail, part, section, zone, function, set of properties, functional features, technology, technological impact.

### 1. Введение

Процесс изготовления деталей заключается в осуществлении таких взаимодействий обрабатывающих инструментов с заготовками, при которых обеспечивается получение формы детали по заданным чертежам с поверхностными свойствами в заданных участках и свойствами структуры материала для всей детали или в заданных зонах в значениях и пределах, указанных в конструкторской документации (КД). Каждая деталь проектируется с целью выполнения заданной целевой функции в составе механизмов и машин [1, 2], а для возможности ее реализации предпринимаются необходимые технологические воздействия [3, 4] инструментов на заготовки, необходимые в процессе изготовления для формирования свойств, установленных в КД деталей.

Опираясь на разработанную ранее матрицу частных функции частей, участков и зон деталей, описанную как целевые функции деталей, и представляющую множество

всех функциональных проявлений для каждой конкретной детали, можно определить полное множество технологических воздействий на каждый элемент детали. Весь комплекс функций детали представлен как набор функционалов по направлениям проявления – по форме и размерам; по поверхностным свойствам; по структурным характеристикам материала и свойствам его в заданной точке любой части, участка, зоны и микрзоны детали, достижение которых необходимо обеспечить технологическими средствами.

### **Цель и задачи**

Цель настоящей работы заключается в создании формализованной взаимосвязи функционально значимых геометрических признаков детали, образующих формы частей, участков и зон деталей с комплексом функционально ориентированных технологических схем воздействия при точечном способе формообразования заданных конструкторской документацией форм и очертаний всех частей обрабатываемой детали.

Поставленная цель достигается решением некоторых частных задач.

1. Установить возможные и необходимые траектории движения формообразующей точки инструмента относительно заготовки:

- установить возможные элементарные траектории движения точки как точки формообразования поверхностей детали;

- установить возможные сочетания элементарных движений, придаваемых точке и определить возможные виды траекторий ее перемещения в пространстве;

- определить способ формального задания местоположения формообразующей точки инструмента в системе координат технологического комплекса;

2. Разработать множество структурных схем функционального технологического воздействия на заготовку с целью точечного способа формообразования.

3. Установить формальную взаимосвязь между геометрическими функционально значимыми атрибутами детали и траектории перемещения формообразующей точки в системе координат технологического комплекса.

4. Установить взаимосвязь описания геометрической формы детали в собственной системе координат с полным функционалом функционально ориентированного технологического воздействия при точечном формообразовании детали.

### **2. Основное содержание и результаты работы**

На основании проведенных ранее исследований установлен формализованный образ целевой функции на примере детали блок-вал колес КПП без разрыва потока передаваемой мощности. Синтез структурных схем технологического воздействия и поиск оптимальной схемы можно проиллюстрировать на примере этой же детали (рис. 1).

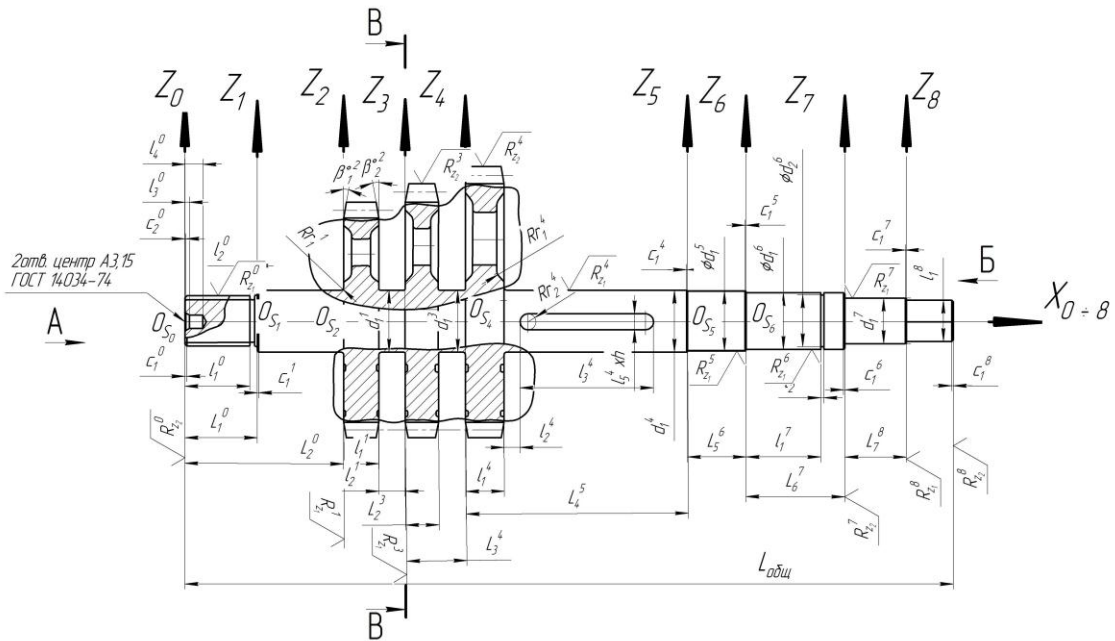


Рисунок 1. Чертеж блок-вала КПП, работающей без разрыва потока передаваемой мощности

На рис. 2 и рис. 3 представлены вид А и вид Б с обоих торцов блок-вала с указанием соответствующих видимых поверхностей, ограничивающих объем детали.

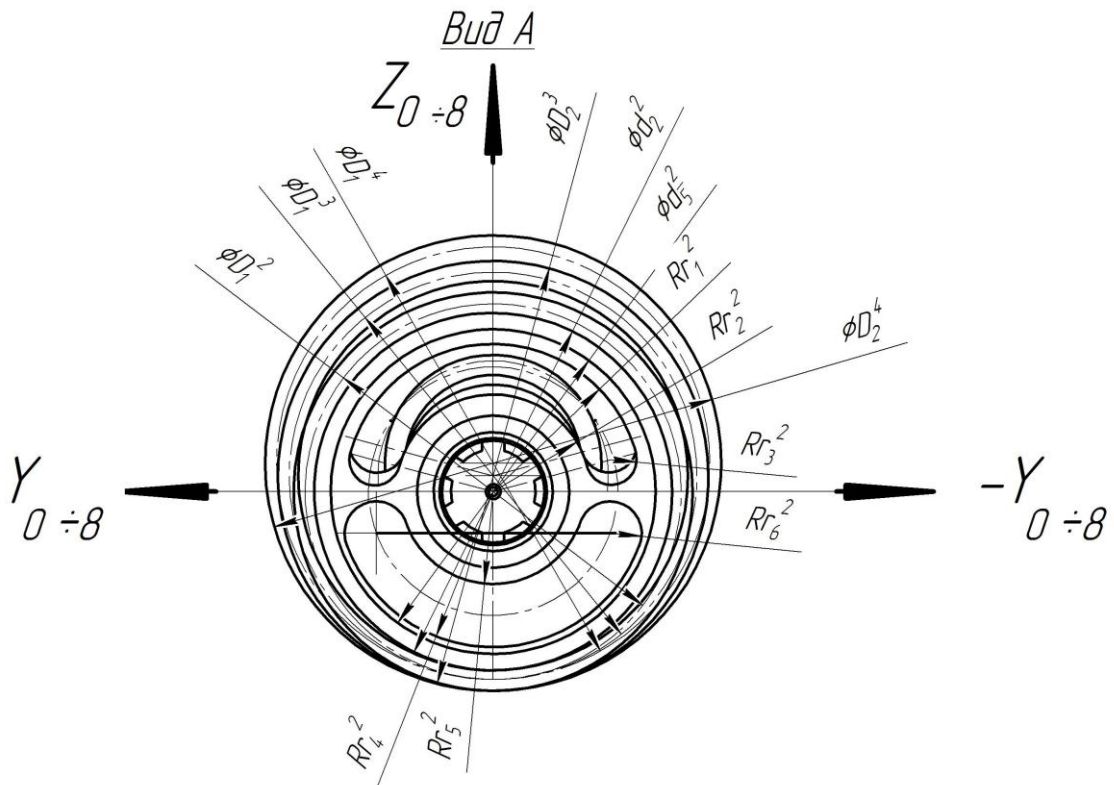


Рисунок 2. Блок-вал колес – Вид. А

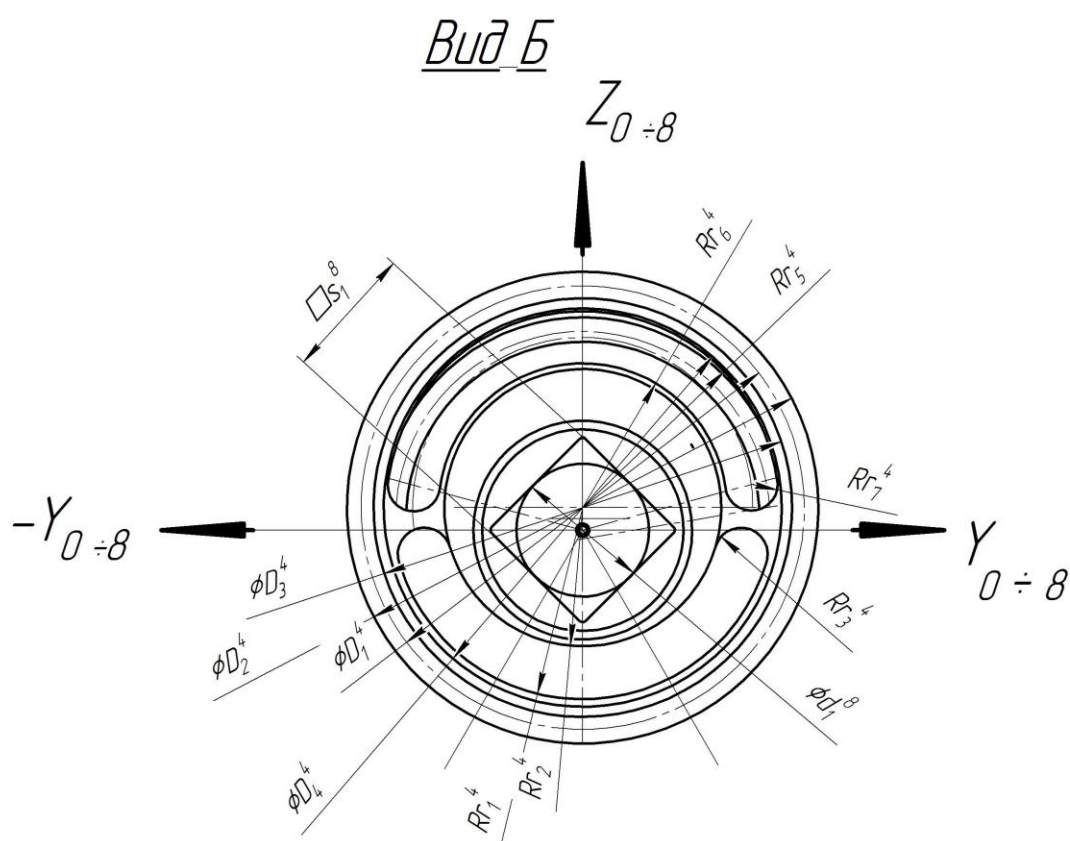


Рисунок 3. Блок-вал колес – Вид Б

Поверхности детали обозначены буквами русского алфавита, индексы цифровые при символах означают аналогичные поверхности схожих частей и участков детали.

Все возможные технологические воздействия разделим условно на три категории по функциональному влиянию на изменение свойств обрабатываемой детали:

- $T^{\Phi}$  - технологические воздействия формообразования;
- $T^{\Pi}$  - технологические воздействия формирования свойств поверхности;
- $T^M$  - технологические воздействия формирования структурных свойств материала детали.

Чаще всего такие воздействия не осуществляются по отдельности, а выполняют комплексную функцию  $T^K$  формирования свойств как по формообразованию и геометрии, так и по формированию поверхностных свойств [3, 4, 6, 7] и структуры материала. Иногда технологическое воздействие на деталь объединяет формирование свойств не по всем категориям, а только каким-либо двум направлениям. В качестве примеров формирования структуры и свойств материала в слоях детали различной локализации при одновременном формообразовании можно привести способы обработки давлением, литье, порошковое спекание, наплавку материала, и др.

Комплексное технологическое воздействие по видам и категориям формирования различных свойств обрабатываемых деталей формально можно представить как объединение некоторых множеств, зависящих от применяемого оборудования, типов инструментов[5]:

$$\left. \begin{aligned} T^K &= T^{0K} \cup T^{1K} \cup T^{2K} \cup T^{3K}, \\ T^{0K} &= T^\Phi \cap T^\Pi \cap T^M; \\ T^{1K} &= T^\Phi \cap T^\Pi; \\ T^{2K} &= T^\Phi \cap T^M; \\ T^{3K} &= T^\Pi \cap T^M. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Характер инструментального воздействия на заготовку при этом может быть точечным, линейным, поверхностным или объемным [8]. Кроме того, известно, что формировать деталь можно несколькими принципиальными способами:

- удалением излишков объема материала от заготовки – как правило, резанием;
- изменением формы и размеров заготовки без изменения объемов и количества материала в заготовке – как правило, деформированием начальной формы заготовки путем обработки давлением;
- добавлением определенного объема (количества) материала, начиная от нулевого количества, например литье или 3-D печать, или добавлением до какого-то уже имеющегося объема заданной формы, например путем наварки, наплавки, напыления и других технологий.

В выражении (1) символами  $T^{0K}$ ,  $T^\Phi$ ,  $T^\Pi$  и  $T^M$  обозначаются технологические воздействия при формообразовании, формирования поверхностных свойств и формирования структурных свойств материала традиционными методами, а для способов формирования свойств деталей методом добавления материала в обозначении добавляем знак плюс «+» в верхней части индексов:  $T^{+0K}$ ,  $T^{+\Phi}$ ,  $T^{+\Pi}$  и  $T^{+M}$ , что означает  $T^{+\Phi}$  - формообразование добавлением материала;  $T^{+\Pi}$  - формирование свойств поверхностей методом добавления материала;  $T^{+M}$  – формирование структурных свойств материала детали; и  $T^{+0K}$  - общее комплексное формирование свойств детали.

Рассмотрим отдельно технологические воздействия формирования структуры материала в заданных зонах, формообразования и формирования поверхностных свойств.

Известно, что геометрические формы детали образуются при обработке заготовки резанием реализацией точечного или линейчатого контакта инструментальной поверхности с заготовкой. При этом линия инструмента может быть прямолинейной, или непрямолинейной. Точечный контакт считаем условно, т.к. в действительности точка инструмента имеет определенные размеры, полученные при изготовлении инструмента с заданным углом при вершине и радиусом скругления режущей кромки.

При совершении одного относительного прямолинейного движения – вдоль одной оси координат инструментальной точки - при резании можем получить на заготовке только одну прямую линию – рис. 4а. При смещении в поперечном направлении на величину подачи – еще одну линию - рис. 4б, число которых может составлять заданное множество. Конечное множество таких линий обеспечивает получение плоской поверхности на заготовке в заданных размерах – рис. 4в.

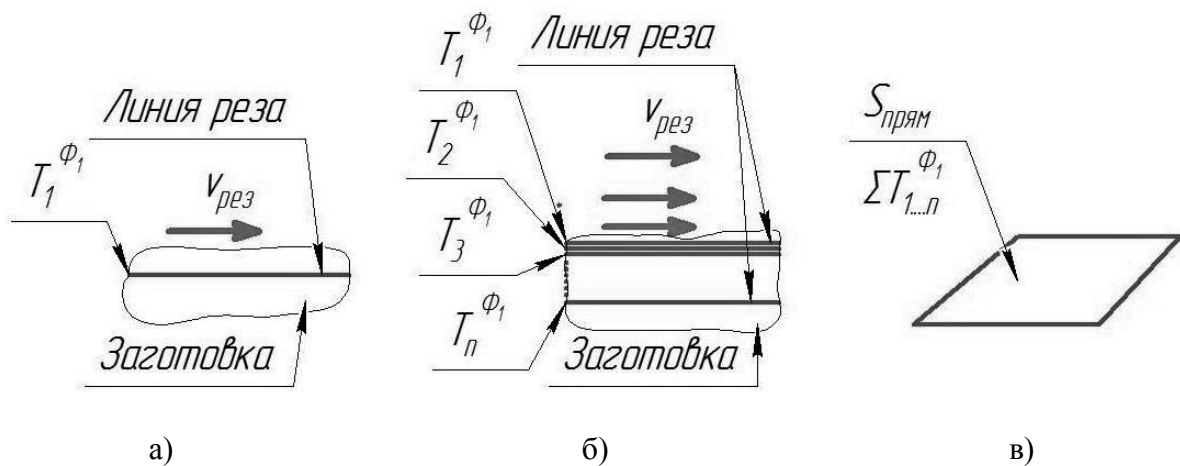


Рисунок 4. Структурные схемы взаимодействия инструмента с заготовкой при точечном контакте с реализацией одного относительного движения по одной оси координат:

- а - одно прямолинейное относительное движение (главное движение резания);
- б - к главному движению добавлены последовательные поперечные перемещения точки контакта;
- в - результат взаимодействия – плоская поверхность.

При добавлении к линейному перемещению инструментальной точки рис. 5, а еще одного направления движения, одновременно в поперечном направлении (по другой оси) координат, получаем кривую линию в одной плоскости. Форма кривой зависит от соотношения скоростей перемещения инструментальной точки вдоль разных осей координат, и таких линий резов можно выполнить некоторое множество – рис. 5, б. Конечное множество повторений таких линий позволяет получить криволинейную поверхность на заготовке, см. рис. 5, в.

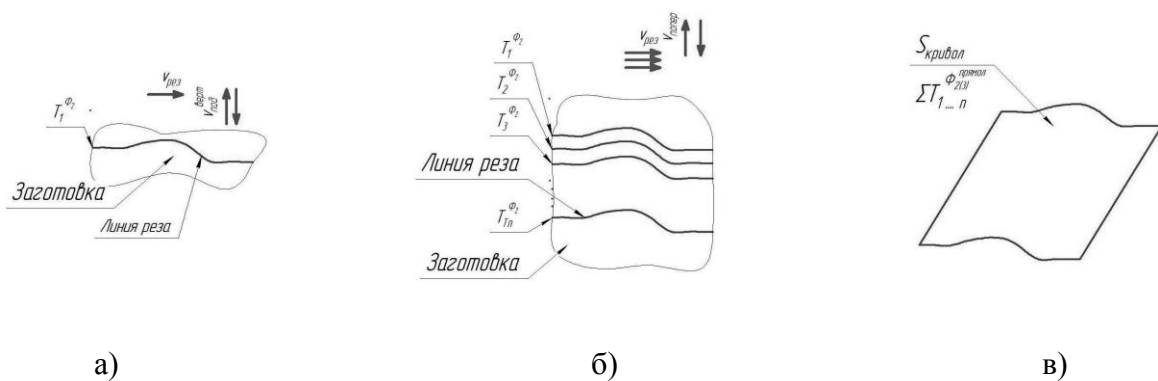


Рисунок 5. Структурные схемы взаимодействия инструмента с заготовкой при точечном контакте с реализацией относительного движения по двум осям координат:

- а - одно относительное прямолинейное главное движение  $v_{рез}$ - резания и одно дополнительное движение в перпендикулярном направлении;
- б - главное и дополнительное движения (осуществляются последовательно периодически поперечные перемещения точки контакта);
- в - результат взаимодействия – криволинейная поверхность.

С помощью комбинирования скорости движущейся точки резания в двух разных направлениях, по координатам можно добиваться необходимой кривизны линии, а в совокупности линий и кривизны поверхности в нужной зоне детали.

При реализации последовательного добавления или изменения по двум осям координат направления режущей точки инструмента можно получать ступенчатые поверхности на детали, как приведено на рис. 6.

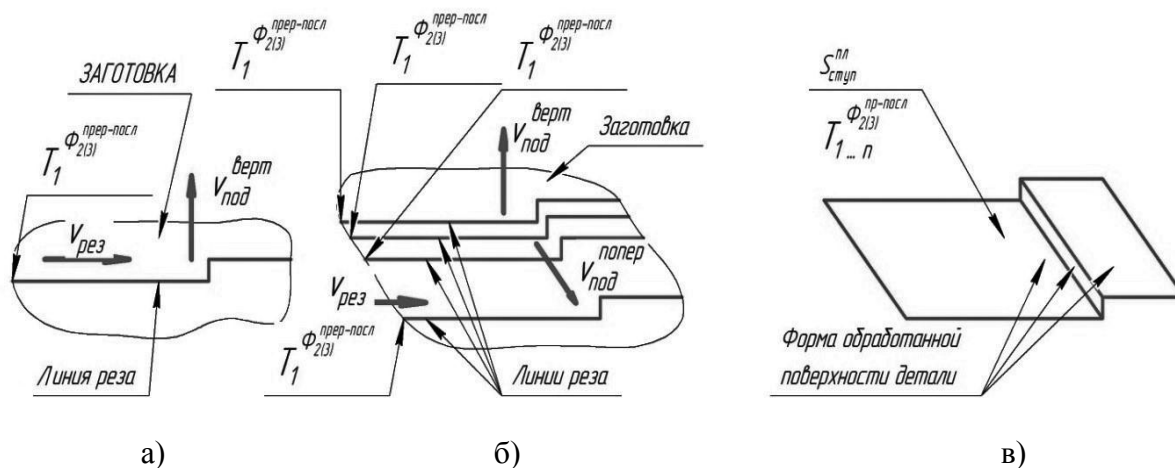


Рисунок 6. Структурные схемы точечного взаимодействия инструмента с заготовкой при прямолинейном главном движении и периодическом поперечном движении:

- а - линия перемещения режущей точки инструмента с периодическим добавлением движения в поперечном направлении;
- б - циклическое смещение точки контакта на шаг перемещения по другой оси координат поперечного перемещения;
- в - форма получаемой поверхности при указанных движениях.

Ступенчатые формы поверхностей деталей можно получать путем осуществления равномерного прямолинейного главного движения и периодически изменяя направление движения в заданной точке траектории. Так на рис. 6, а показана линейная траектория движения одной точки.

На рис. 6, б приведена схема формирования ступенчатой поверхности детали при помощи дополнительного движения подачи, осуществляемой после окончания каждого перемещения по траектории от начала до конца обрабатываемого участка детали.

На рис. 6, в приведен пример получаемой в результате точечной обработки формы поверхностей в случае реализации рассмотренной схемы взаимодействия инструмента и заготовки.

В случае осуществления одновременного движения режущей точки инструмента в направлении всех трех осей координат с различными переменными скоростями можно получать пространственные поверхности деталей любой заданной формы, в зависимости от соотношения скоростей по разным направлениям. Примеры реализации такой схемы приведены на рис. 7.

Осуществление одновременно с двумя направлениями относительного движения (с главным движением резания и поперечным движением подачи) движения еще в направлении одной координатной оси, позволяет получить любую объемную кривую, а множество объемных кривых линий позволяет получить объемную поверхность самой



разнообразной формы. Необходимая форма образуется путем параметризации относительных движений точки по осям системы координат, в которой производится обработка детали.

На всех схемах типы взаимодействия контактных точек инструмента с заготовкой обозначены символами  $T_i \Phi_j^{пер}$ , где  $\Phi_j^{пер}$  представляет собой обозначение процесса формообразования, в котором верхний индекс отражает характер осуществления подачи относительно главного движения (прерывистый, последовательный, одновременный и др.), а нижний индекс  $j$  при  $\Phi$  отражает количество дополнительных движений по разным осям координат, при этом индекс  $i$  при символе  $T$  отражает количество линий или траекторий на обрабатываемой поверхности заготовки, а сам символ  $T$  обозначает технологическое взаимодействие с точечным контактом инструмента и заготовки. Количество линий определяется величиной подачи вдоль оси перемещения режущей точки инструмента.

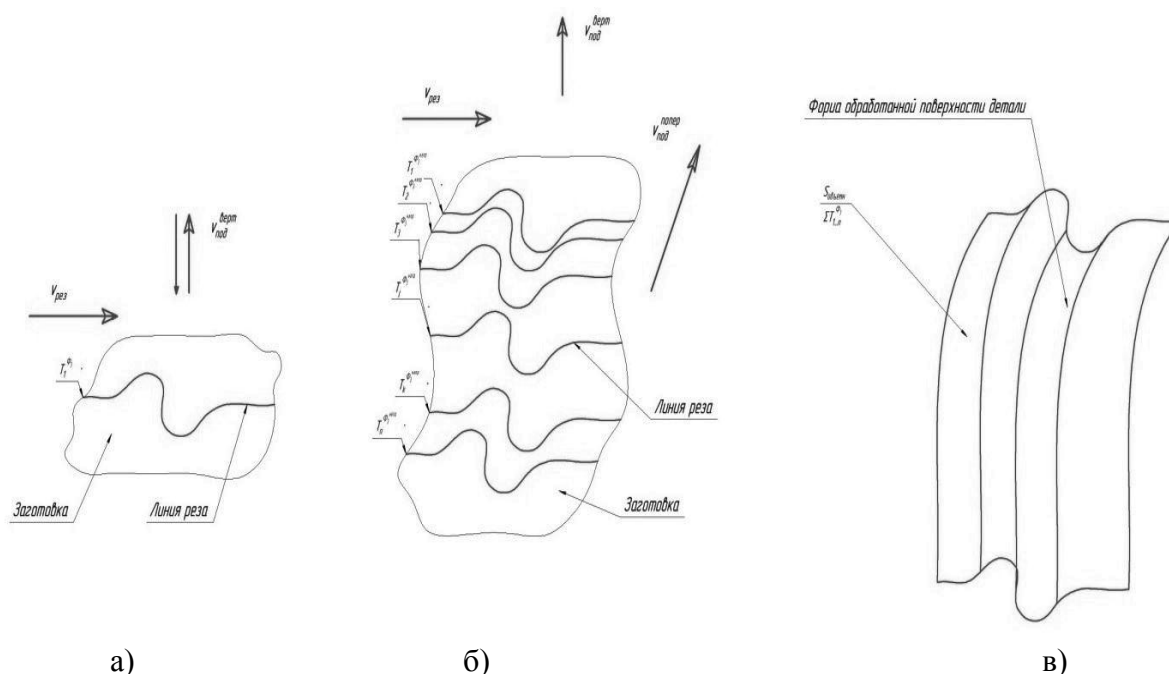


Рисунок 7. Структурные схемы точечного технологического взаимодействия инструмента с заготовкой с реализацией одновременного переменного относительного прямолинейного движения в направлении всех трех осей координат:

- а - пространственная линия траектории движения режущей точки инструмента относительно заготовки;
- б - множество повторяющихся пространственных линий с шаговым смещением;
- в - пример формы получаемой пространственной криволинейной поверхности обрабатываемой детали.

При осуществлении вращательного движения заготовки относительно режущей точки инструмента оптимальным образом получают детали с цилиндрическими или круговыми поверхностями. На рис. 8 приведены примеры схем формообразования обрабатываемых поверхностей деталей при осуществлении вращательного относительно движения точки инструмента и заготовки.

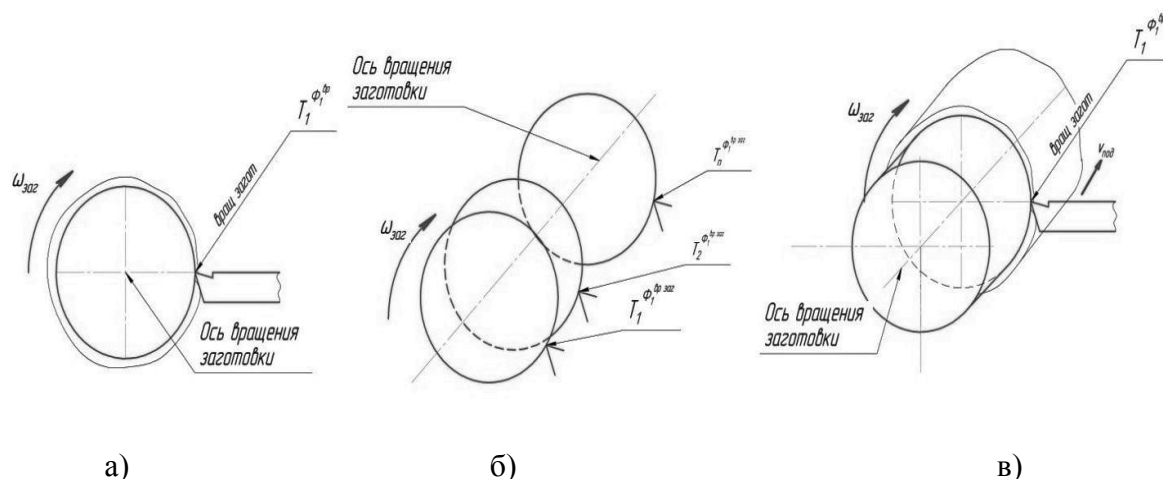


Рисунок 8. Структурная схема точечного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки при ее вращательном движении:  
 а - круговая траектория линии резания;  
 б - подача вдоль оси вращения заготовки дает множество круговых линий;  
 в - обработанная цилиндрическая поверхность.

Формообразование точкой при вращательном движении заготовки образуется кольцевая траектория относительного движения в системе координат детали. Подача на оборот позволяет получить спиральную траекторию относительного движения точки резания  $T_{i(1...n)}^{\Phi_j^{φ_0}}$  к обрабатываемой поверхности заготовки, а прерывистая циклическая на величину шага дает возможность получить множество кольцевых линий на поверхности. Функционально это может давать различную структуру поверхности. По такой схеме функционального взаимодействия работают токарные станки, которые обеспечивают подачу резца в поперечном направлении к оси вращения заготовки и продольную подачу вдоль этой оси. В символе формального обозначения точечного взаимодействия резца с заготовкой индекс  $\Phi_j^{φ_0}$  обозначает вращательное движение заготовки и не вращающемся инструменте с возможностью обеспечения числа подач по осям, соответствующих тому количественному индексу  $j$ , который указан для конкретной схемы взаимодействия.

На рис. 9 представлена аналогичная схема технологического воздействия при формообразовании с неравномерной подачей по оси в поперечном направлении к оси вращения заготовки. Такая схема позволяет получать форму детали эллипсоидного профиля в поперечном сечении, рис. 9в. Форма кривой, формирующей обрабатываемую поверхность заготовки, зависит от функции, задающей соотношение движения подачи точки контакта в поперечном направлении по отношению к скорости вращения заготовки. Одновременно при формообразовании детали необходимо учитывать также зависимости характера продольного перемещения режущей точки инструмента вдоль оси вращения заготовки от того же аргумента, т.е. функциональная зависимость формообразующих движений является следствием функционального конструктивного задания формы детали в конструкторской документации.

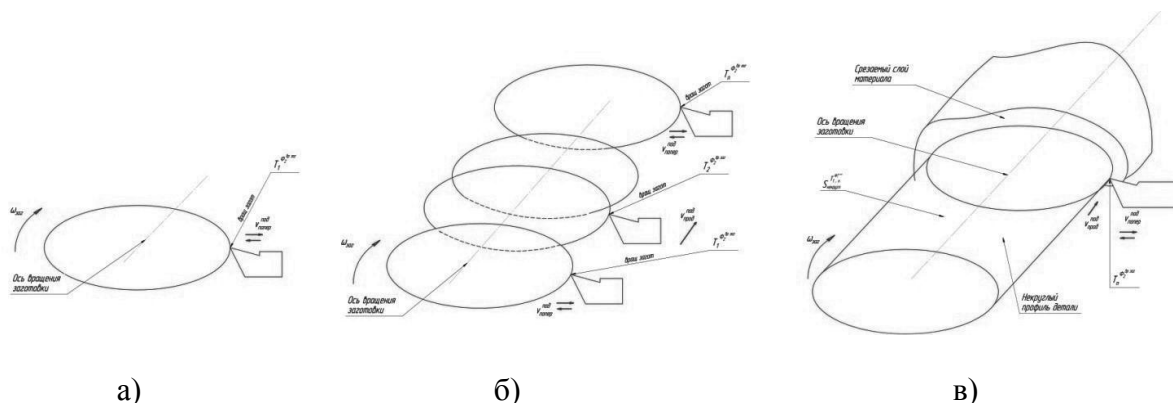


Рисунок 9. Периодическая пульсирующая подача вдоль дополнительной поперечной оси системы координат, дающая нецилиндрическую поверхность:

- а - эллиптическая траектория относительного движения точки резания;
- б - подача вдоль оси вращения и циклическая подача по одной оси в плоскости резания – множество одинаковых некруговых траекторий;
- в - пример эллиптической обработанной поверхности.

Другой характер структурной схемы технологического воздействия инструмента на заготовку в точечном контакте с вращательным движением представляет вариант , когда вращается инструмент при не вращающейся заготовке. По указанной структурной схеме работают расточные станки. На рис. 10а,б,в показаны схемы образования единичной траектории движения точки контакта в относительном движении, образование конечного множества линий траекторий точки контакта, а также получаемой поверхности детали в результате обработки.

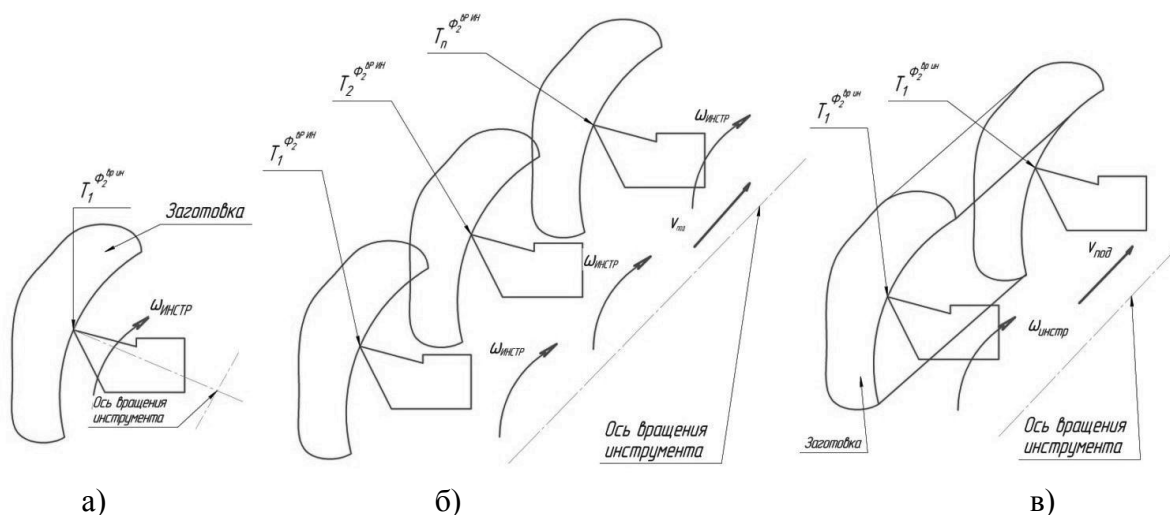


Рисунок 10. Структурная схема технологического воздействия при формообразовании поверхности точечным контактом при вращающемся инструменте: а - траектория относительного движения точки к заготовке – круговая; б - множество линий траектории с заданным шагом; в - форма получаемой поверхности при обработке детали.



нейных и вращательных движений, посредством которых материальная точка переводится в заданную точку координатной системы зоны обработки детали. Тогда любую точку, предусмотренную для расположения режущей точки инструмента в системе координат технологического комплекса оборудования можно задать как функцию движения по осям координат в виде:

$$T_{\Pi_i}^{\Phi_j^{\alpha(I)_{x,y,z}}} = F(X_{\Pi}, Y_{\Pi}, Z_{\Pi}), \tag{2}$$

где  $X_{\Pi}, Y_{\Pi}, Z_{\Pi}$  – координаты формообразующей точки инструмента в рассматриваемой системе пространства  $\Pi$ ; символ  $\Phi$  при  $T$  указывает на осуществление процесса формообразования точкой, при этом число движений в процессе обозначено индексом  $j$ , а индексы  $\alpha$  и  $I$  (единичный вектор системы координат, указывающий направление оси  $X, Y, Z$ ) указывают на применение вращательного или линейного движения вокруг или в направлении соответствующей оси системы координат.

В табл. 1 приведены виды возможных движений при формообразовании поверхности точкой, и соответствующие формализованные обозначения.

Все поверхности частей и участков детали, образующие его геометрические формы и размеры могут быть описаны в функциональном виде в системе полярных или декартовых координат. При этом каждая функциональная часть поверхности детали может быть описана в частной системе координат (9). Например, для детали блок-вал КПП на рис. 1 где каждая отличительная часть поверхности обозначена буквами от «А» до «Я» описана в своей частной системе координат  $S_i$ , (см. рис 2, 3), которая однозначно определена в общей системе  $S_{\Sigma}$  детали. Тогда каждая поверхность детали  $\Pi_j$  в общем виде является функцией параметров  $X, Y, Z$ , т.е.

$$\Pi_j = F(X_{i(i=1,2,\dots,n)}^{\Pi_{j(j=A,B,\dots,Y)}}, Y_{i(i=1,2,\dots,n)}^{\Pi_{j(j=A,B,\dots,Y)}}, Z_{i(i=1,2,\dots,n)}^{\Pi_{j(j=A,B,\dots,Y)}}), \tag{3}$$

где  $X_i^{\Pi}, Y_i^{\Pi}, Z_i^{\Pi}$  являются функциями от  $X, Y, Z$  в частных системах координат частей от «А» до «Я» детали блок-вал.

Общее формализованное обозначение формообразующей точки инструмента в своем перемещении в системе координат технологического комплекса  $T^{\Phi}$  можно представить в виде:

$$T_{\sum(i=1\dots i)}^{\Phi_{дет}} = f(T_{j^z(x,y,z)}^{\Phi_k^{v_i^p(x,y,z)\omega_{x,y,z}^p}} \cap T_{n^z(x,y,z)}^{\Phi_k^{v_i^p(x,y,z)\omega_{x,y,z}^p}}) \tag{4}$$

где  $T^{\Phi}$  является функцией координат  $X, Y, Z$  в системе координат обрабатывающего технологического комплекса, в котором каждая формообразующая точка однозначно соответствует тем точкам поверхностей обрабатываемой детали, которые отражены в выражении (3), и тогда формируемая поверхность  $\Phi^{\Pi}$  может быть представлена в виде функционала функции поверхности  $\Pi_j$  детали (3) и функции движения формирующей точки  $T^{\Phi}$  инструмента (4)

$$\Phi_{T_g}^{\Pi_{\Sigma}} = F(\Pi_{\Sigma}^j \cap T_{\Sigma}^{\Phi}) \tag{5}$$

где  $\Pi_{\Sigma}^j$  и  $T_{\Sigma}^{\Phi}$  являются обобщенными элементами выражения (3) и (4).

Из совместного рассмотрения выражений (3), (4), (5) видно, что функционально значимые признаки детали (атрибуты) в отношении и формообразования могут быть

Таблица 1. Примеры структурных схем формообразования точечным контактом.

<i>Структурные схемы точечного формообразования деталей</i>			
<i>Элементы структурной схемы (виды реализуемых движений)</i>	<i>Формальные обозначения структурных схем</i>	<i>Функциональная связь структурной схемы с конструктивными элементами детали</i>	<i>Вид геометрической формы элементов детали</i>
	$T_i \Phi_1^{i_z}$	$T_i \Phi_1^{i_z} = f_1(pvl)$	Точка, прямая линия
	$T_i \Phi_2^{i_{xz}}$	$T_i \Phi_2^{i_{xz}} = f_2(\Pi_{x,y,z}^{k_{дем}} vL_{x,y,z} S_m^{y4})$	Прямая линия, кривая, плоскость
	$T_i \Phi_3^{i_{xyz}}$	$T_i \Phi_3^{i_{xyz}} = f_3(S_{x,y,z}^{k_{дем}} vL_{x,y,z} S_m^{y4})$	Плоскость, криволинейная и ступенчатая поверхность
	$T_i \Phi_2^{\alpha_{xz}}$	$T_i \Phi_2^{\alpha_{xz}} = f_j(l^{k_{дем}} vS_{x,y,z}^{y4})$	Окружность, цилиндр, некруговая линия
	$T_i \Phi_3^{\alpha_{xy}i_x}$	$T_i \Phi_3^{\alpha_{xy}i_x} = f_i(S^{k_{дем}} \wedge S_{x,y,z}^{y4})$	Криволинейные поверхности
	$T_i \Phi_4^{\alpha_{xyz}i_x}$	$T_i \Phi_4^{\alpha_{xyz}i_x} = f_k(S^{k_{дем}} \wedge S_{x,y,z}^{y4})$	Криволинейные объемные поверхности детали
	$T_i \Phi_3^{\alpha_{xy}i_x}$	$T_i \Phi_3^{\alpha_{xy}i_x} = f_r(S_{цил}^{k_{дем}} \wedge S_{x,y,z}^{y4})$	Цилиндрические, эллипсоидные поверхности
	$T_i \Phi_4^{\alpha_{xy}i_{xz}}$	$T_i \Phi_4^{\alpha_{xy}i_{xz}} = f_s(S^{k_{дем}} \wedge S_{x,y,z}^{y4})$	Криволинейные поверхности тел вращения
	$T_i \Phi_5^{\alpha_{xyz}i_{xz}}$	$T_i \Phi_5^{\alpha_{xyz}i_{xz}} = f_s(S_{x,y,z}^{k_{дем}} \wedge S_{x,y,z}^{y4})$	Любые объемные формы детали
	$T_i \Phi_4^{\alpha_{x}i_{xyz}}$	$T_i \Phi_4^{\alpha_{x}i_{xyz}} = f_p(S_{x,y,z}^{k_{дем}} \wedge S_{x,y,z}^{y4})$	Любые криволинейные объемные формы детали
	$T_i \Phi_5^{\alpha_{xy}i_{xyz}}$	$T_i \Phi_5^{\alpha_{xy}i_{xyz}} = f_t(S_{x,y,z}^{k_{дем}} \wedge S_{x,y,z}^{y4})$	Любые криволинейные объемные формы детали
	$T_i \Phi_6^{\alpha_{xyz}i_{xyz}}$	$T_i \Phi_6^{\alpha_{xyz}i_{xyz}} = f_u(S_{x,y,z}^{k_{дем}^{1-g}} vS_{x,y,z}^{var})$	Любые криволинейные объемные формы детали
	$T_i \Phi_7^{\alpha_{xyz}i_{xyz}^{\alpha}}$	$T_i \Phi_7^{\alpha_{xyz}i_{xyz}^{\alpha}} = f_u(S_{x,y,z}^{k_{дем}^{1-g}} vS_{x,y,z}^{var})$	Любые криволинейные объемные формы детали
	$T_i \Phi_7^{\alpha_{xyz}i_{xyz}^{\alpha} \alpha_y^{\alpha}}$	$T_i \Phi_7^{\alpha_{xyz}i_{xyz}^{\alpha} \alpha_y^{\alpha}} = f(S_{x,y,z}^{k_{дем}^{1-g}} vS_{x,y,z}^{var})$	Любые криволинейные объемные формы детали
	$T_i \Phi_8^{\alpha_{xyz}i_{xyz}^{\alpha} \alpha_y^{\alpha} i_z^{\alpha}}$	$T_i \Phi_8^{\alpha_{xyz}i_{xyz}^{\alpha} \alpha_y^{\alpha} i_z^{\alpha}} = f(S_{x,y,z}^{k_{дем}^{1-g}} vS_{x,y,z}^{var})$	Любые криволинейные объемные формы детали

обеспечены реализацией нескольких вариантов комплексных функционально ориентированных точечных технологических воздействий.

Чтобы итеративно выбрать оптимальный вариант обработки в конкретных условиях производства необходим перебор возможных сочетаний функционального технологического воздействия на основе рекуррентного подхода с постепенным приближением к оптимальному значению назначенного критерия выбора.

В приведенной ниже таблице формализовано представлены варианты структурных схем формообразования точечным контактом режущего инструмента с заготовкой при сообщении различных сочетаний движений инструмента относительно заготовки. При этом учитываются направления основных прямолинейных движений относительно осей систем координат, в которых определены положение заготовки и инструмента, а также направления дополнительных и вспомогательных прямолинейных и вращательных движений элементов технологического обрабатывающего комплекса.

Надо отметить, что не все теоретически возможные и приведенные в таблице варианты сочетания движений для рассмотренных синтезированных структурных схем формообразования технически могут быть достижимы, в частности, при реализации процессов резания при механической обработке на современном металлорежущем оборудовании и с применением современной оснастки. Однако эти схемы точечного преобразования формы детали могут быть реализованы при осуществлении процессов иного вида, например, электролучевым, лазерным или иным методом.

### **Заключение.**

В настоящей работе выполнен комплекс исследований, позволивших установить однозначную взаимосвязь между функционально значимыми элементами обрабатываемой детали и функционально ориентированными схемами технологического воздействия на заготовку при реализации точечного способа формообразования.

Синтезировано множество элементарных структурных схем траектории движения точки инструмента, образующей создаваемую поверхность детали.

- установлены траектории движения точки при элементарных движениях;
- установлены траектории движения точки при придании дополнительных прямолинейных и вращательных движений, как точки, так и заготовки;
- формально описаны траектории движения формообразующей точки в системе координат технологического комплекса.

2. Разработано множество структурных схем формообразования с помощью подвижной точки инструмента, позволяющих обеспечивать получения многообразных форм детали при сочетании различных элементарных движений в технологическом комплексе.

3. Установлена формальная взаимосвязь между геометрическими функционально значимыми атрибутами детали и формой траектории перемещения формообразующей точки в системе координат технологического комплекса.

4. Установлена взаимосвязь описания геометрической формы детали в собственной системе координат с полным функционалом функционально ориентированного технологического воздействия при точечном формообразовании детали в координатной системе технологического комплекса (таблица 1).

Синтезированные и рассмотренные структурные схемы формообразования как объекты, устанавливающие однозначно функциональную связь между указанными в КД на деталь конструктивными требованиями, обеспечивающими частную функцио-

нальную предназначенность каждого элемента детали в комплексе общей целевой функции детали, определяющей ее форму и размеры.

Практическое использование результатов выполненных в настоящей работе исследований позволяет формализовать выбор удовлетворяющих установленным критериям вариантов структурных схем механической обработки и формообразования деталей с реализацией точечного контакта режущей части инструмента и заготовки.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Артоболевский, И. И. Механизмы в современной технике. Справочное пособие для инженеров, конструкторов и изобретателей. В 7 томах: Элементы механизмов. Простейшие рычажные и шарнирно-рычажные механизмы Т. 1. Изд. 3. – 2019. – 500 с.
2. Гуревич, Ю. Е. Детали машин и основы конструирования. Исходные положения. Механические передачи: учебник / Ю. Е. Гуревич. – Издательство ТНТ, 2015. – 407 с.
3. Технология машиностроения, в 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения. Бурцев В. М., Васильев А. С., Дальский А. М. и др. под ред. Дальского А. М. – Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
4. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
5. Ивлев, Ю. В. Логика: Учебник / Ю.В. Ивлев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. – 270 с.
6. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.
7. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения: учебник для машиностроительных специальностей вузов / И. М. Колесов – М.: Высш. шк., 2001. – 591 с.
8. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк, ДонНТУ, 2009. – 346с.
9. Михайлов, А. Н. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий / Михайлов А.Н., Котляров Б.С., Котляров В.Б., Котляров С.Б. //Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 3 (70). – С. 22-33.

Поступила в редколлегию 21.02.2021 г.



УДК 621.793.71

<sup>1</sup>Ф. И. Пантелеенко, чл.-корр. НАН Б, д.т.н., проф., <sup>1</sup>В. А. Оковитый, к.т.н.,

<sup>1</sup>О. Г. Девойно, д.т.н., проф., <sup>1</sup>А. С. Володько, <sup>1</sup>В. А. Сидоров, к.т.н., доцент,

<sup>1</sup>В. В. Оковитый,

<sup>2</sup>В. М. Асташинский, чл.-корр. НАН Б, д.физ.-мат.наук, проф.

<sup>3</sup>В. В. Углов, д. физ.-мат. наук, проф.

<sup>1</sup>Белорусский Национальный Технический Университет, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

<sup>1</sup>Тел./Факс+375 17 293-95-99, <sup>1</sup>[niil\\_svarka@bntu.by](mailto:niil_svarka@bntu.by)

<sup>2</sup>Тел./Факс +375 17 284-24-91, <sup>2</sup>[ast@hmti.ac.by](mailto:ast@hmti.ac.by)

<sup>3</sup>Тел./Факс +375 17 2095134, <sup>3</sup>[Uglov@bsu.by](mailto:Uglov@bsu.by)

## ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ М-КРОЛЕЙ И ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ

В статье приведены результаты исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка и степени охлаждения сжатым воздухом на характеристики многослойных плазменных покрытий. На оптимальных режимах (ток дуги -600А; дистанция напыления-110 мм; расход плазмообразующего газа азота-50 л/мин; фракционный состав порошка диоксида циркония <50 мкм; расход сжатого воздуха для охлаждения 1 м<sup>3</sup>/мин; р=4 атм) мы получаем покрытий на основе диоксида циркония с коэффициентом использования материала -62%; общую пористость керамического слоя -6%. После воздействия на покрытие компрессионными плазменными потоками в атмосфере азота кубическая модификация оксида циркония является основной фазой, присутствующей в покрытии. Параметр решетки кубической модификации оксида циркония составляет 0,5174 нм. Ввиду использования азота в качестве плазмообразующего вещества происходит его взаимодействие с атомами циркония покрытия и образуется нитрид циркония с-ZrN с кубической кристаллической решеткой (параметр решетки 0,4580 нм). Происходит плавление приповерхностного слоя, причем глубина расплавленного слоя, согласно результатам растровой электронной микроскопии составляет около 8 мкм. Закристаллизовавшийся после воздействия компрессионными плазменными потоками приповерхностный слой характеризуется гомогенным распределением элементов и отсутствием пор, образованных при формировании покрытия. Структура самого покрытия представлена совокупностью крупных (5 – 7 мкм) и мелких (1 – 2 мкм) частиц оксида циркония, спеченных между собой. После воздействия компрессионными плазменными потоками на сформированное покрытие происходит плавление его поверхностного слоя и его скоростная кристаллизация. В результате возникновения внутренних механических напряжений в закристаллизовавшейся части происходит растрескивание поверхностного слоя. Детальный анализ структуры поверхности с помощью растровой электронной микроскопии позволил выявить формирование в закристаллизовавшейся части ячеистой структуры со средним размером ячеек менее 1 мкм, формирование которых может быть вызвано скоростной кристаллизацией расплавленного слоя.

**Ключевые слова:** плазменная струя, антиметиоритные покрытия, коэффициент использования материала, компрессионные плазменные потоки, кубическая модификация оксида циркония.

F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devojno, A. S. Volodko, V. A. Sidorov, V. V. Okovity,  
V. M. Astashinsky, V. V. Uglov

## FORMATION AND INVESTIGATION OF MULTILAYER COMPOSITE OF PLASMA COATINGS BASED ON M- CROUL AND OXIDE CERAMICS FOLLOWED BY A HIGH-ENERGY MODIFICATION

© Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Володько А.С., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М., Углов В.В.; 2021.

*The article contains results research of influence of parameters a plasma jet (current, spraying distance, plasma gas consumption) fractional composition of the starting powder and the degree of cooling compressed air on anti-meteoritic coating characteristics. We get an anti-meteoritic coatings based on zirconia at optimum modes (arc current -600A; spray distance of 110 mm; plasma gas consumption 50 l/min; fractional composition of zirconia powder <50 microns; air consumption for cooling 1 m<sup>3</sup>/min; p = 4 bar) with materials utilization rate - 62%, total porosity of the ceramic layer -6%. Cubic zirconia modification is the main phase present in the coating after exposure to coating compression plasma flows in a nitrogen atmosphere. The lattice parameter of cubic zirconia is 0.5174 nm . Because of the use of nitrogen as the plasma substance. The article contains results research of influence of parameters a plasma jet (current, spraying distance, plasma gas consumption) fractional composition of the starting powder and the degree of cooling compressed air on anti-meteoritic coating characteristics. We get an anti-meteoritic coatings based on zirconia at optimum modes (arc current -600A; spray distance of 110 mm; plasma gas consumption 50 l/min; fractional composition of zirconia powder <50 microns; air consumption for cooling 1 m<sup>3</sup>/min; p = 4 bar) with materials utilization rate -62%, total porosity of the ceramic layer -6%. Cubic zirconia modification is the main phase present in the coating after exposure to coating compression plasma flows in a nitrogen atmosphere. The lattice parameter of cubic zirconia is 0.5174 nm. Because of the use of nitrogen as the plasma substance*

## 1. Введение

Воздействие космического вакуума на материалы, естественно, учитывается при выборе материалов для космических аппаратов. В общем случае при конструировании космических аппаратов и их систем противометеорной защиты используются материалы достаточно легкие, прочные, радиационно стойкие и имеющие низкое газовыделение. Кроме того, к материалам для пилотируемых космических аппаратов предъявляются дополнительные требования по невозгораемости и нетоксичности. Для материалов некоторых космических аппаратов требуется также коррозионная стойкость и отсутствие магнитных свойств [1]. Наиболее часто в качестве материалов для космических аппаратов и их систем противометеорной защиты используются алюминиевые и в меньшей степени титановые сплавы. Магниевого сплавы, хотя и более легкие, чем алюминиевые, однако менее предпочтительны, так как обладают меньшей коррозионной и ударной стойкостью. Эти и некоторые другие недостатки магниевых сплавов не исключают полностью их использование для космических нужд. Сталь, хотя она и в три раза более тяжелая, чем алюминиевые сплавы, тем не менее, может быть сравнима с ними по удельным прочностным характеристикам. Обычно используются нержавеющие стали (хромоникелевые), причем предпочтение отдается немагнитным аустенитным формам [2]. Широко используется в конструкциях космических аппаратов сотовая панель в виде сэндвича. Она образуется двумя тонкими листами алюминиевого сплава («кожа»), между которыми помещены гексагональные ячейки (соты), изготовленные из фольги, а также алюминиевого сплава [3]. Сотовые ячейки склеиваются между собой, и приклеиваются к «коже» синтетической смолой. Стенки ячеек перфорированы, для того чтобы дать выход газам изнутри панели. Однако такой конструктивный элемент, несмотря на его легкость и сравнительную прочность, является источником большего газовыделения, чем обычный плоский металлический лист. Широко также используются неметаллические композиционные материалы, такие, например, как угольный стекловолоконный слоистый пластик. Скорости газовыделения у таких материалов примерно такие же, как у любых других материалов, содержащих около 50% эпоксидной смолы. Для таких материалов весьма нежелательно их насыщение влагой, однако этого можно избежать, если хранить изделия в сухом газе (например, азоте). Наконец, в конструкциях космических аппаратов широко используются разнообразные полимерные пластики, в том числе алюминированные пластиковые (майларовые) фольги, краски на полимерной основе, эластомерные уплотнения из фторуглеродной резины типа «Витон» и жаропрочные никелевые сплавы. Применение оксидной керамики в ракетно-космической

технике для решения целого ряда комплексных материаловедческих проблем обусловлено более высокой температурой плавления этих материалов по сравнению с полимерными пластиками и жаропрочными никелевыми сплавами [4]. Вследствие применения высокотемпературных газовых струй, использование газотермического напыления наиболее эффективно для нанесения покрытий из оксидной керамики, которые имеют высокую прочность связи в кристаллической решетке и одновременно обладают высокой когезионной прочностью, твердостью, износостойкостью. Разработка и создание композиционных керамических материалов обусловлено необходимостью улучшения свойств плазменных покрытий для нанесения противометеорной защиты [5]. Наиболее широкое применение для нанесения керамических покрытий, в том числе из материалов на основе оксидной керамики получил метод плазменного напыления (до 90% работ) [6-9]. Плазменный метод нанесения покрытий используется в современной технике для упрочнения и восстановления деталей. Плазменным методом наносятся покрытия из металлических проволок, порошковых материалов, керамики и композиционных материалов. Как правило, экономически наиболее целесообразно упрочнение-восстановление этим методом ответственных и дорогостоящих деталей. Этот метод является универсальным, в связи с тем, что на одном оборудовании при соответствующих режимах можно производить напыление широкой гаммы материалов и реализовывать целый ряд технологий. Возможно напыление большой номенклатуры деталей с минимальными затратами на технологическую оснастку [10].

## **2. Анализ и выбор возможных вариантов напыления композиционных многослойных покрытий из порошков различного состава на модели элементов экранов противометеорной защиты**

Эффективность защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется противоударной стойкостью используемых материалов. Применительно к противометеорной защите космических аппаратов высокопрочные гомогенные и гетерогенные металлы и сплавы, металлокомпозиты, пористоволокнистые и другие должны удовлетворять основным требованиям – минимальная плотность, высокие вязкопластичные свойства, твердость [1,3]. Из общих физических соображений следует, что эффективность защиты определяется уровнем поглощения кинетической энергии метеорных частиц материалом покрытия. Не касаясь всех механизмов поглощения энергии, укажем, что значительная ее часть расходуется на упругую и пластическую деформацию материала покрытий. Высокая пластичность и вязкость является существенным фактором увеличения стойкости. Повышение твердости резко снижает пластичность и вязкость, приводит к хрупкому разрушению. Типичные конструкционные материалы для противометеорных экранов: алюминиевые сплавы, титан, сталь. Еще большей противоударной стойкостью обладают многослойные структуры с твердым керамическим лицевым слоем и подслоем из вязкого металлического материала. Во многих агрессивных средах, особенно при высоких температурах оксиды значительно более стойки по сравнению с карбидами, боридами и нитридами [11-13]. К специфическим свойствам оксидов следует отнести их низкие теплопроводность и электропроводность. Большинство оксидов, применяемых для напыления покрытий, имеет высокую температуру плавления. Многие из них обладают высокой твердостью и износостойкостью. Оксиды, особенно высшие, являясь конечными продуктами окисления, инертны к окислительным средам. Оксидные покрытия наиболее универсальны в условиях эксплуатации и могут быть использованы как коррозионностойкие и жаростойкие, теплозащитные, электроизоляционные и износостойкие. Благодаря невысокой стоимости ряда промышленных оксидов и их универсальных эксплуатационных свойств окси-

дная группа материалов получила особенно широкое применение в напыленных плазменных покрытиях [14-16]. При плазменном напылении оксидов одним из наиболее распространенных дефектом является отслаивание покрытий. Причем этот дефект может проявляться непосредственно в процессе напыления и при эксплуатации покрытия [17]. Отслаивания вызваны, как правило, большей разницей в коэффициентах термического расширения оксидной покрытия и напыляемого изделия. Для частичного сглаживания температурного коэффициента линейного расширения применяют подслои. При выборе материала подслоя необходимо стремиться также к образованию на границе раздела высокой адгезионной прочности. По этой причине часто в качестве промежуточного слоя напыляют соединения металлидного типа, например, NiAl, NiCr и др.

Оксид циркония ( $ZrO_2$ ). В качестве материалов оксидной керамики в ракетно-космической технике наибольшее применение в настоящее время получили композиции на основе диоксида циркония частичного стабилизированного оксидами редкоземельных металлов (ЧСЦД) [6-11]. Это обусловлено рядом его свойств: низким коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  ( $0,6-1,3 \text{ Втм}^{-1}\text{К}^{-1}$ ) и сравнительно высоким коэффициентом линейного термического расширения  $\alpha$  ( $6-13 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ), соизмеримым с коэффициентами для жаропрочных сплавов на основе Ni и Co ( $15-17 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ), возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики [12-15]. В частности, циркон и цирконаты щелочноземельных металлов имеют близкие с ЧСЦД физические свойства, однако их применение ограничено недостаточно высокими механическими свойствами. Основным методом, используемым для нанесения покрытий из диоксида циркония, является плазменное напыление. Положительные результаты получены также при использовании электронно-лучевого, ионно-плазменного напыления, магнетронного распыления. Тем не менее, преимущественное распространение плазменного напыления сохраняется, прежде всего, вследствие его высокой производительности и универсальности, позволяющей наносить металлические и керамические материалы заданного химического и фазового состава. В общем случае антиметиоритные покрытия представляет собой многослойную систему, включающую металлический подслои и внешний керамический слой [7-9]. Основной причиной разрушения плазменных покрытий является термомеханические напряжения, вследствие рассогласования термического расширения металла основы и керамического слоя, а также неравномерности распределения температурного поля в покрытии. Термомеханические напряжения усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытии при напылении, и ослабляются эффектами пластичности и ползучести, реализующимися в металлическом подслое. Значительная структурная чувствительность свойств покрытий на основе диоксида циркония требует строгой воспроизводимости результатов. Это накладывает особо жесткие ограничения на качество используемых материалов и точность поддержания технологических режимов нанесения покрытия. Основная функция подслоя в плазменных покрытиях - пластическая релаксация напряжений, возникающих из-за несогласованного изменения объемов керамических и металлических материалов при нагреве и охлаждении покрытия. Так как пластичность сплавов катастрофически уменьшается в результате их высокотемпературного окисления, а слой керамики является проницаемым для газов, материал подслоя должен обладать высокой жаростойкостью [14-17]. Поэтому проблема формирования подслоя сцепления сводится к решению двух основных задач: 1) обеспечение необходимой пластичности подслоя в рабочем интервале температур; 2) обеспечение его жаростойкости. Комплексное решение данных задач затруднено, поскольку увеличение жаростойкости сплавов на основе никеля путем повышения концентрации образующих защитные пленки элементов:

алюминия, хрома, неизбежно сопровождается резким снижением пластичности сплава [18,19]. Необходима жесткая оптимизация химического и фазового состава сплава. Современные сплавы на основе никеля, используемые для нанесения жаростойких и стойких к высокотемпературной коррозии покрытий, содержат 6-12% Al, 20-30% Cr. Содержание алюминия всегда больше, чем в покрываемом сплаве-подложке, для увеличения жаростойкости материала. Однако, по этой же причине, сплав покрытия оказывается более хрупким, чем материал подложки. Хрупкое покрытие является источником зарождения усталостных трещин, и, если усталостное разрушение изделия не является прямым следствием высокотемпературной коррозии либо окисления, то всегда приводит к уменьшению циклической прочности сплавов. Хром значительно слабее снижает пластичность сплавов, поэтому увеличение его содержания свыше 20% позволило снизить концентрацию алюминия, сохранив необходимые жаростойкость и пластичность материала. Учитывая вышеизложенное, и актуальность проблемы, целью предлагаемых исследований является разработка технологических принципов формирования композиционных многослойных покрытий на моделях элементов экранов противометеорной защиты из порошков различного состава.

### **3. Оптимизация процесса нанесения многослойного покрытия на основе диоксида циркония**

В процессе плазменного напыления действует большое число факторов, оказывающих влияние на свойства получаемых покрытий. Важнейшими из них при прочих равных условиях являются: расход плазмообразующего и транспортирующего газов, расход распыляемого порошка, ток электрической дуги (подводимая мощность), дистанция напыления, скорость перемещения подложки [1-5]. В качестве примера на рисунке 1-5 представлен характер зависимостей эффективности плазменного напыления твердого комбинированного слоя на основе диоксида циркония на подложке из никель-хрома, характеризовать которые можно с помощью коэффициента использования распыляемого материала (порошка) КИП, % от перечисленных условий напыления. Зависимость КИП от дистанции напыления показана на рисунке 1. При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой  $<t_{пл}$ .

В нашем случае возрастание КИП идет до  $L=100$  мм для порошков  $ZrO_2$  с фракцией  $< 50$  мкм и до  $L=110$  мм с фракцией 50–63 мкм, дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица из-за длительного нахождения в струе переплавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИП падает [1-5].

Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа (рисунки 2 и 3) до определенных значений приводят к увеличению КИП, т.к. эти параметры влияют на степень проплавления порошка [6]. Дальнейшее их увеличение приводит к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно КИП уменьшается. Для  $R_{N_2}=55$  л/мин максимальный КИП=66% соответствует  $I=600$  А, для  $R_{N_2}=50$  л/мин максимальный КИП=62% соответствует  $I=650$  А. Для различных фракций порошка  $ZrO_2$  ( $<50$  мкм, 50–63 мкм) при различных токах дуги  $I$  (400 А, 500 А, 600 А, 700А) было измерено процентное содержание фаз в порошке.

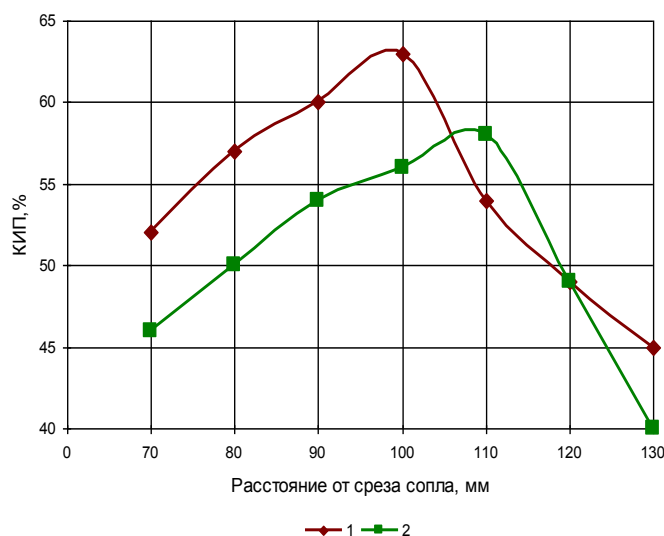


Рисунок 1. Зависимость КИП, % от дистанции напыления  $L$ , мм для порошков  $ZrO_2$ : 1- с фракцией  $< 50$  мкм; 2- с фракцией 50–63 мкм; ( $I=500$  А,  $R_N=50$  л/мин,  $R_{пор.}=4,5$  кг/час)

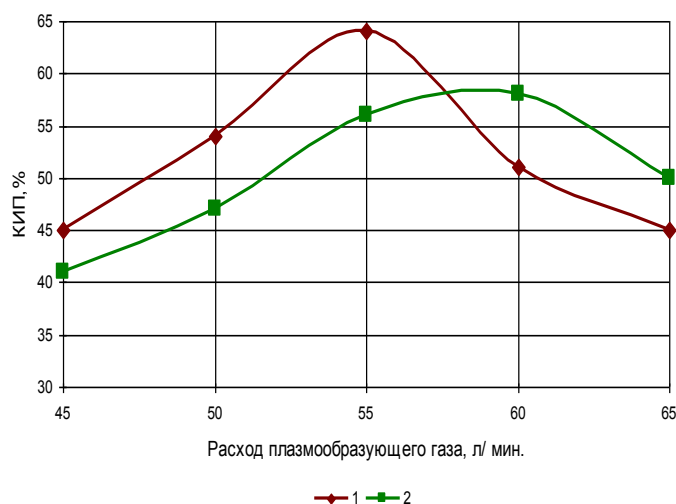


Рисунок 2. Зависимость КИП, % от расхода плазмообразующего газа  $N_2$  для порошков  $ZrO_2$ : 1 - с фракцией  $< 50$  мкм; 2 - с фракцией 50–63 мкм; ( $L=100$  мм;  $I=500$  А;  $R_{пор.}=4,5$  кг/час)

При увеличении размера фракции с  $< 50$  мкм до 50-63 мкм в покрытии уменьшится количество тетрагональной фазы (рисунок 4), приводящее к ухудшению ударной вязкости. Влияние расхода подачи порошка на КИП показано на рис. 5. Так как в формировании покрытия принимают участие все частицы в плазменной струе, то наилучшими свойствами будут обладать покрытия, отвечающие плазменным режимам, где доля расплавленных частиц в струе и их концентрация максимальны.

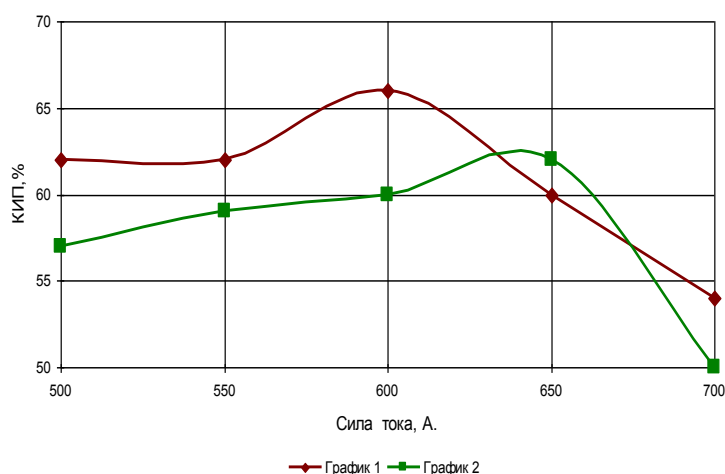


Рисунок 3. Зависимость КИП, % от силы тока электрической дуги I, А для порошков  $ZrO_2$ : 1 - с расходом плазмообразующего газа  $N_2$   $R_N=55$  л/мин; 2 - с  $R_N=50$  л/мин; ( $L=100$  мм,  $R_{пор.}=4,5$  кг/час, с фракцией  $< 50$  мкм)

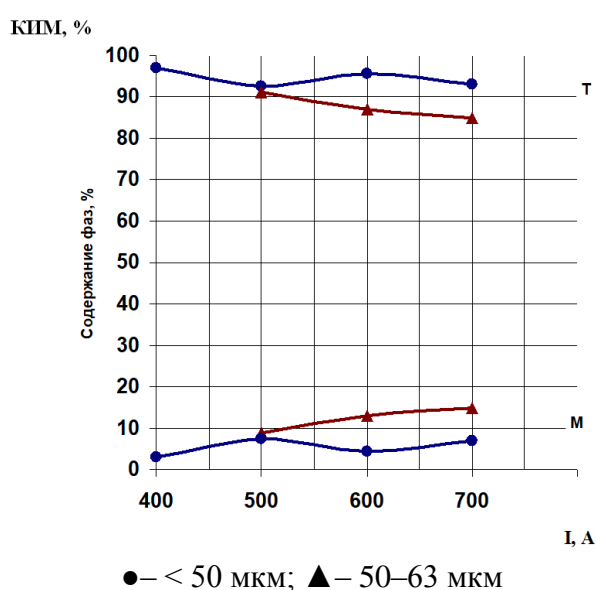


Рисунок 4. Влияние тока и размеров частиц порошка на фазовый состав при напылении покрытий на основе  $ZrO_2$  ( $R_{N_2}=55$  л/мин,  $L=110$  мм,  $R_{пор.}=2$  кг/ч)

Для определенных выше оптимальных режимов максимальный КИП соответствует расходу порошка 4,5 кг/ч, при дальнейшем увеличении расхода КИП уменьшается, поскольку тепловой энергии плазменной струи не хватает для расплавления всех подаваемых в струю частиц. С увеличением степени охлаждения при одинаковых скоростях подачи порошка КИП уменьшается [7]. В результате проведенной оптимизации отработаны режимы напыления APS (плазменное напыление на воздухе) процесса для материалов  $ZrO_2$ . Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала. На оптимальных режимах для  $ZrO_2$  (расход плазмообразующего газа азота - 55 л/мин, ток- 600А, дистанция напы-

ления-100 мм, фракция порошка <50 мкм, расход порошка 4,5 кг/час) получены покрытия с КИП - 68 %.

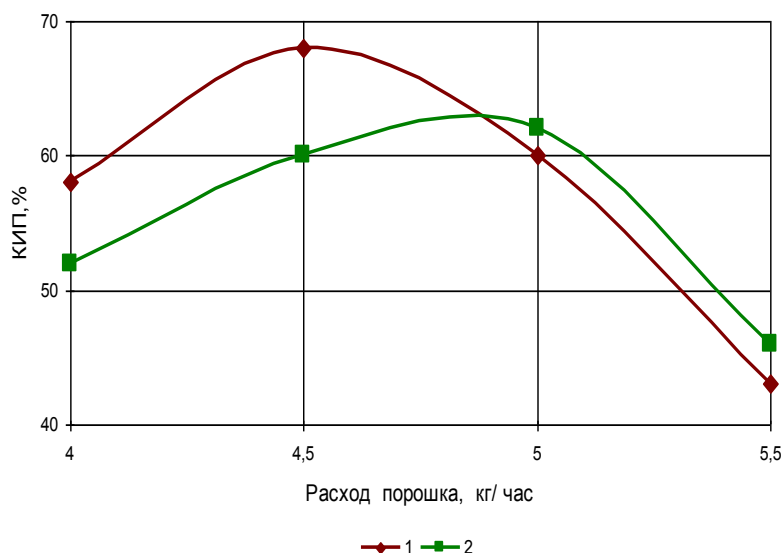


Рисунок 5. Зависимость КИП, % от расхода порошка  $R_p$ , кг/час для порошков  $ZrO_2$ : 1 - с фракцией < 50 мкм; 2 - с фракцией 50-63 мкм ( $L=100$  мм;  $I=600$  А;  $R_N=55$  л/мин)

#### 4. Исследование плазменного композиционного покрытия на основе оксида циркония, обработанного компрессионным плазменным потоком

После воздействия на покрытие компрессионными плазменными потоками в атмосфере азота кубическая модификация оксида циркония сохраняется как основная фаза, присутствующая в покрытии, что обнаружено с помощью рентгеноструктурного анализа (рис. 7). При этом исчезает обнаруженная в исходном состоянии фаза моноклинной модификации оксида циркония. Параметр решетки кубической модификации оксида циркония составляет 0,5174 нм. Результаты расшифровки полученной рентгеновской дифрактограммы представлены в табл. 1. Ввиду использования азота в качестве плазмообразующего вещества происходит его взаимодействие с атомами циркония покрытия и образуется нитрид циркония  $c-ZrN$  с кубической кристаллической решеткой (параметр решетки 0,4580 нм). Согласно данным рентгеноспектрального микроанализа (табл. 2) в состав покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками также входят цирконий и кислород с незначительным содержанием металлов (Ni, Hf, Y). В составе покрытия было обнаружено 3,4 ат. % азота. Анализ морфологии поверхности покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками, проведенный с помощью растровой электронной микроскопии, показал наличие развитого рельефа поверхности с частичным ее оплавлением (рис. 8).



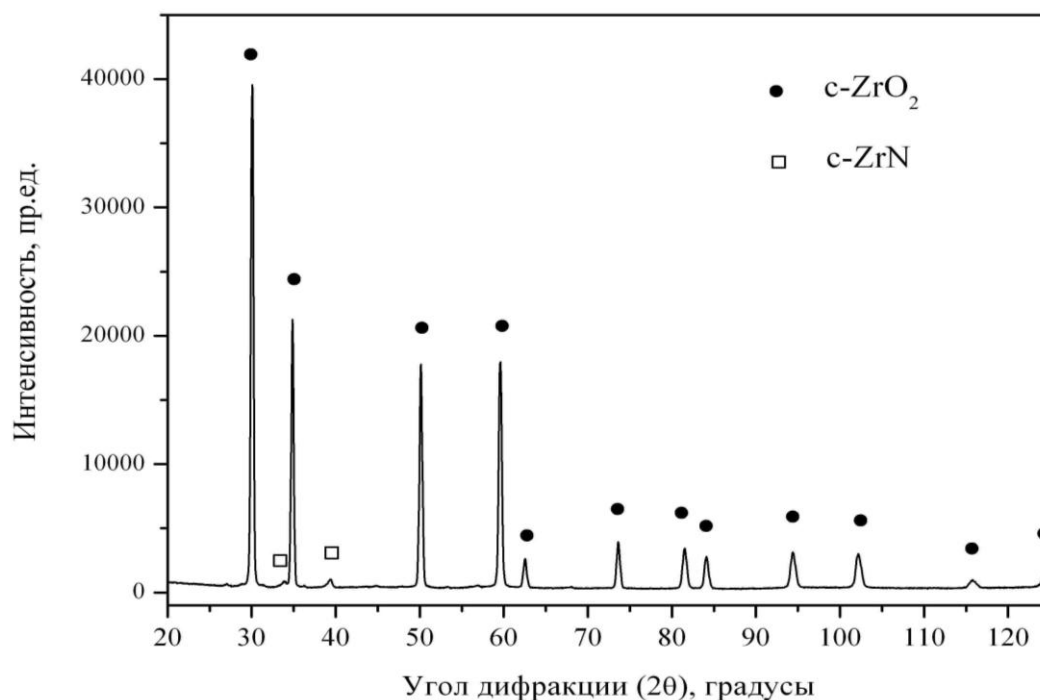


Рисунок 7. Рентгеновская дифрактограмма покрытия после воздействия компрессионным плазменным потоком

Таблица 1. – Результаты расшифровки рентгеновской дифрактограммы покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками

Угловые положения дифракционных линий покрытия после обработки КПП (2θ), градусы	Межплоскостные расстояния дифракционных линий покрытия после обработки КПП, нм	Межплоскостные расстояния дифракционных линий (d) и их кристаллографические плоскости (hkl) эталонов			
		c-ZrO <sub>2</sub>		c-ZrN	
		d, нм	(hkl)	d, нм	(hkl)
30,06	0,2970	0,29646	(111)		
33,94	0,2639			0,26429	(111)
34,86	0,2572	0,25645	(200)		
39,32	0,2290			0,22890	(200)
50,13	0,1818	0,18152	(220)		
59,58	0,1550	0,15467	(311)		
62,53	0,1484	0,14810	(222)		
73,63	0,1285	0,12808	(400)		
81,53	0,1180	0,11770	(331)		
84,11	0,1150	0,11468	(420)		
94,42	0,1049	0,10470	(422)		
102,21	0,0990	0,09865	(511)		
115,81	0,0909	0,09062	(440)		
124,71	0,0870	0,08669	(531)		

Структура самого покрытия представлена совокупностью крупных (5 – 7 мкм) и мелких (1 – 2 мкм) частиц оксида циркония, спеченных между собой (рис. 9). После воздействия компрессионными плазменными потоками на сформированное покрытие происходит плавление его поверхностного слоя и его скоростная кристаллизация. В результате возникновения внутренних механических напряжений в закристаллизовавшейся части происходит растрескивание поверхностного слоя (рис. 10). Детальный анализ структуры поверхности с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 11) позволил выявить формирование в закристаллизовавшейся части ячеистой структуры со средним размером ячеек менее 1 мкм, формирование которых может быть вызвано скоростной кристаллизацией расплавленного слоя. Изучение поперечных шлифов с помощью растровой электронной микроскопии позволило определить толщину покрытия, которая составляет 500 – 520 мкм (рис. 12). Между подложкой алюминия и покрытием из оксида циркония  $ZrO_2$  обнаружен подслой, содержащий никель и алюминий, толщина этого слоя, определенная из распределения характеристического рентгеновского излучения атомов, пропорционального их концентрации, вдоль поперечного сечения, составляет 60 мкм (рис. 13 – 15). После воздействия компрессионными плазменными потоками толщина и элементный состав подслоя не изменяется.

Таблица 2. – Элементный состав покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками

Элемент	Концентрация	
	% (вес.)	% (ат.)
Zr	59,0	30,0
O	19,0	55,0
N	1,3	4,5
Ni	0,3	0,3
Hf	1,6	0,4
Y	18,8	9,8
Сумма:	100,0	100,0

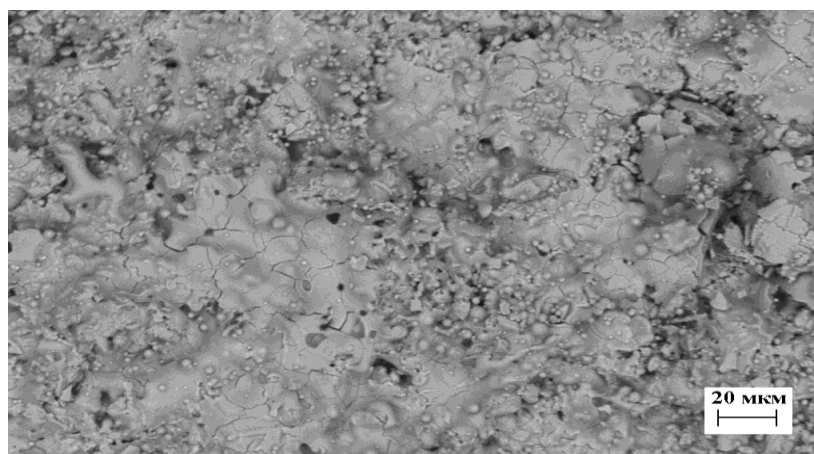


Рисунок 8. РЭМ-изображение участка поверхности покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками (увеличение x1000)

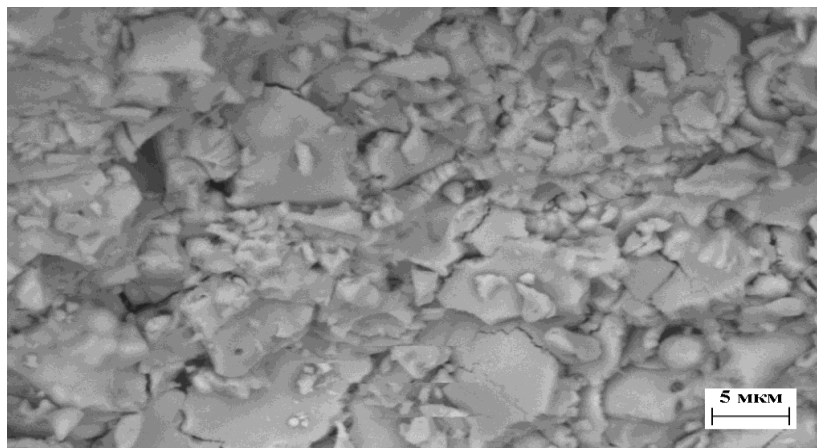


Рисунок 9. РЭМ-изображение участка поверхности покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками (увеличение x5000)

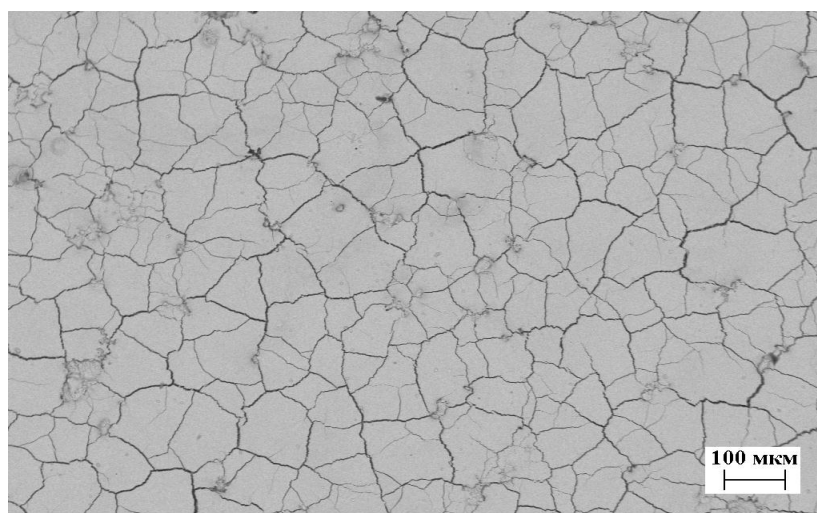


Рисунок 10. РЭМ-изображение участка поверхности покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками (увеличение x200)

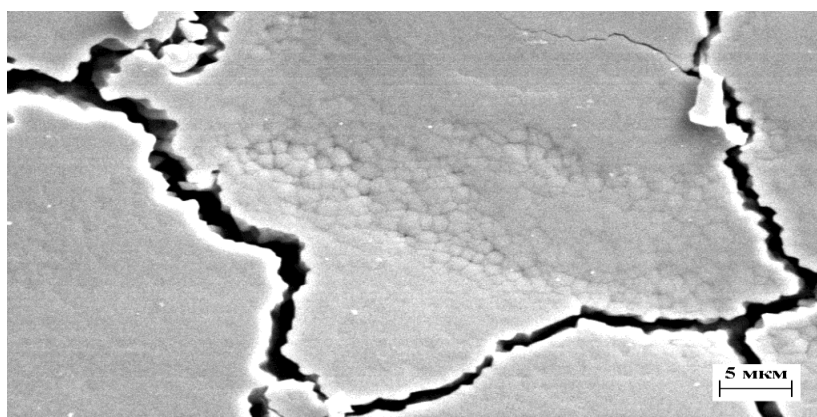


Рисунок 11. РЭМ-изображение участка поверхности покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками (увеличение x5000)

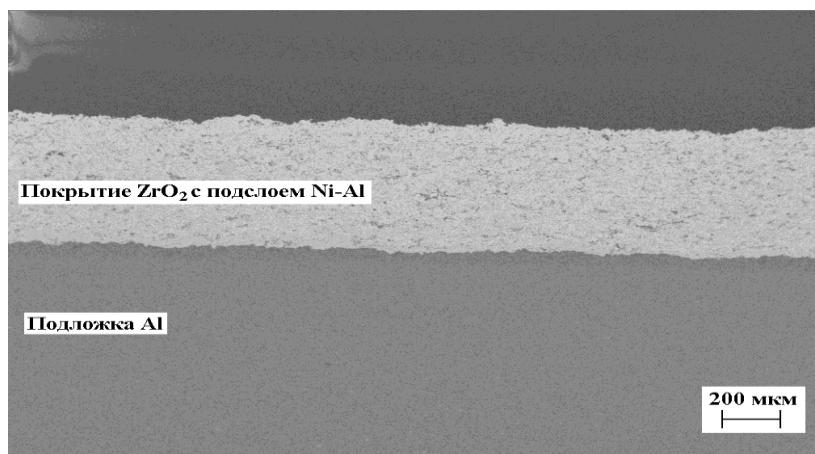


Рисунок 12. РЭМ-изображение поперечного шлифа покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками

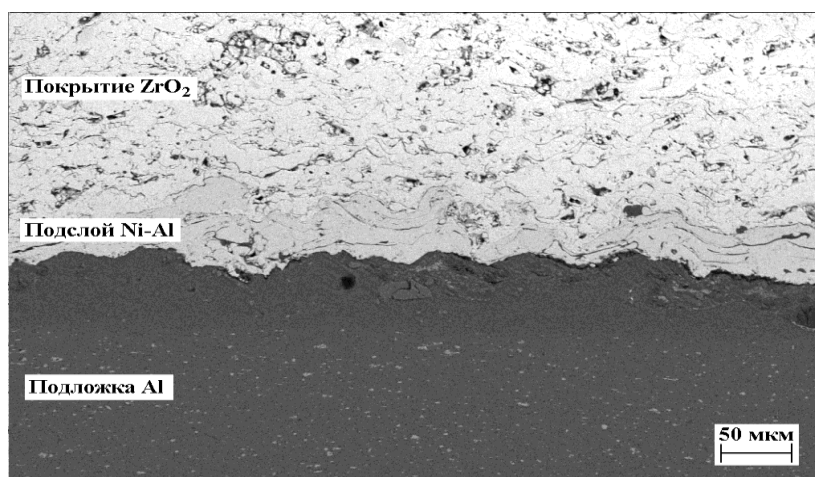


Рисунок 13. РЭМ-изображение участка поперечного шлифа покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками

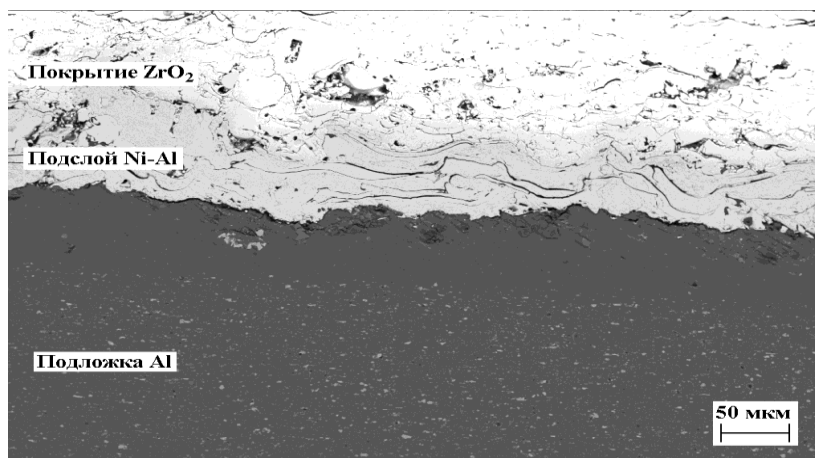
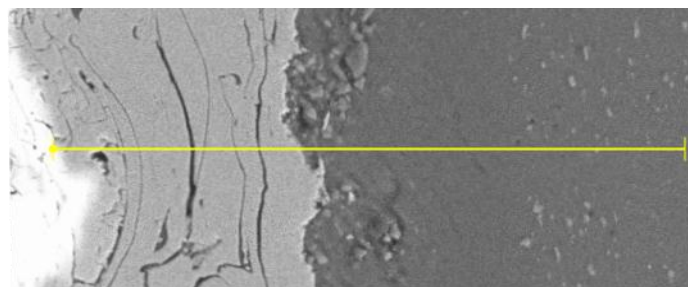
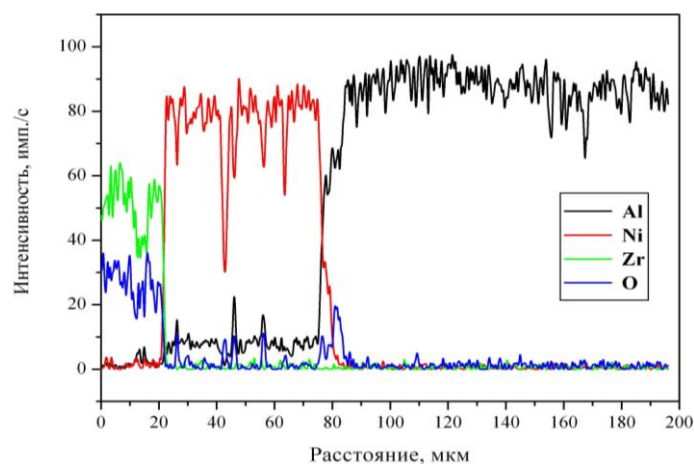


Рисунок 14. РЭМ-изображение участка поперечного шлифа покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками



а)



б)

Рисунок 15. РЭМ-изображение (а) поперечного шлифа подслоя и распределение интенсивности характеристического рентгеновского излучения атомов (б) вдоль выделенного направления

После воздействия на покрытие  $ZrO_2$  компрессионными плазменными потоками происходит плавление приповерхностного слоя, причем глубина расплавленного слоя, согласно результатам растровой электронной микроскопии (рис.16) составляет около 8 мкм. Закристаллизовавшийся после воздействия компрессионными плазменными потоками приповерхностный слой характеризуется гомогенным распределением элементов и отсутствием пор, образованных при формировании покрытия.

В результате исследования трибологических характеристик покрытий (рис. 17) был определен коэффициент трения, который в установившемся режиме для исходного покрытия составляет 0,5 – 0,6, в то время как для покрытия, обработанного компрессионными плазменными потоками, коэффициент трения снижается до 0,4. Снижение коэффициента трения покрытия на основе оксида циркония после воздействия компрессионными плазменными потоками является результатом сглаживания поверхности при кристаллизации, а также упрочнения приповерхностного слоя за счет формирования фазы нитрида циркония  $ZrN$ . Таким образом, исследование элементного и фазового состава сформированных покрытий позволили установить в них наличие фазы оксида циркония  $ZrO_2$  кубической модификации и подслоя на основе  $Ni-Al$  толщиной 60 мкм. В результате воздействия компрессионными плазменными потоками на покрытия происходит плавление приповерхностного слоя толщиной 8 мкм и образование кубического нитрида циркония  $ZrN$ .

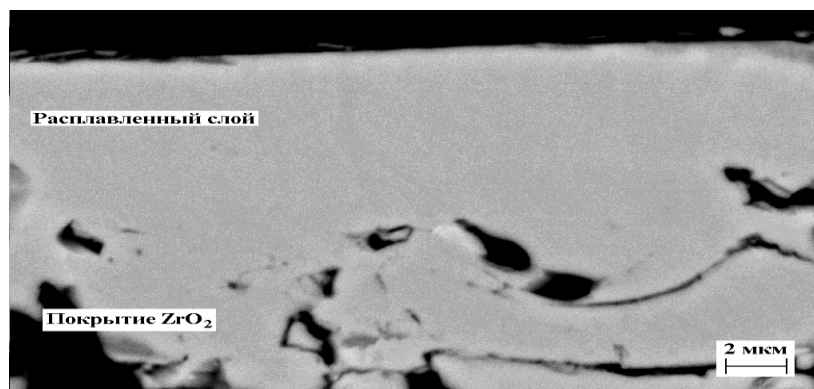


Рисунок 16. РЭМ-изображение участка поперечного шлифа приповерхностного слоя покрытия, расплавленного после воздействия компрессионными плазменными потоками

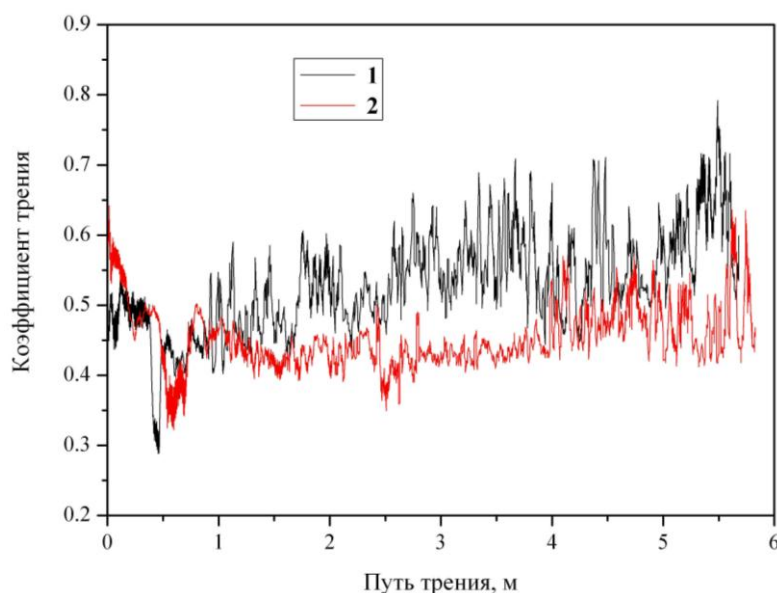


Рисунок 17. Зависимость коэффициента трения исходного покрытия (1) и покрытия, обработанного компрессионными плазменными потоками (2), от пути трения

## 6. Заключение

Эффективность защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется противоударной стойкостью используемых материалов. Применительно к противометеорной защите космических аппаратов высокопрочные материалы должны удовлетворять основным требованиям – минимальная плотность, высокие вязкопластичные свойства, твердость. Таким характеристикам соответствуют керамические плазменные покрытия. На основе анализа произведен выбор возможных вариантов напыления композиционных многослойных покрытий из порошков оксидной керамики (оксид алюминия, оксид циркония) и пластичного подслоя на модели элементов экранов противометеорной защиты. Для обеспечения высокой ударной вязкости структура многослойного покрытия на основе диоксида циркония должна содержать более 90% тетрагональной фазы диоксида циркония и менее 10% моноклинной. При этом фазовый состав и ударная вязкость покрытий зависят как от химического со-

става, так и способа получения порошка. Оптимизация параметров напыления антиметиоритных покрытий на основе диоксида циркония проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала и максимального содержания тетрагональной фазы диоксида циркония в напыленном покрытии. Проведены исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка и степени охлаждения сжатым воздухом на характеристики антиметиоритных покрытий. На оптимальных режимах (ток дуги - 600А; дистанция напыления-110 мм; расход плазмообразующего газа азота - 50 л/мин; фракционный состав порошка диоксида циркония < 50 мкм; расход сжатого воздуха для охлаждения 1 м<sup>3</sup>/мин; p=4 атм) мы получаем антиметиоритных покрытий на основе диоксида циркония с коэффициентом использования материала - 62%; содержание тетрагональной фазы-96%.

После воздействия на покрытие компрессионными плазменными потоками в атмосфере азота кубическая модификация оксида циркония является основной фазой, присутствующей в покрытии. Параметр решетки кубической модификации оксида циркония составляет 0,5174 нм. Ввиду использования азота в качестве плазмообразующего вещества происходит его взаимодействие с атомами циркония покрытия и образуется нитрид циркония *c*-ZrN с кубической кристаллической решеткой (параметр решетки 0,4580 нм). Происходит плавление приповерхностного слоя, причем глубина расплавленного слоя, согласно результатам растровой электронной микроскопии составляет около 8 мкм. Закристаллизовавшийся после воздействия компрессионными плазменными потоками приповерхностный слой характеризуется гомогенным распределением элементов и отсутствием пор, образованных при формировании покрытия. Структура самого покрытия представлена совокупностью крупных (5 – 7 мкм) и мелких (1 – 2 мкм) частиц оксида циркония, спеченных между собой.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Акишин, А. И. Космическое материаловедение. Методическое и учебное пособие – М: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209с.
2. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия Т. 16, 17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. Новикова Л. С., Панасюка. М. И. – М.: Изд-во ЭНЦИТЕХ, 2001.
3. Effects of Space Conditions on materials. Ed. A.I. Akishin, 2001, Nova Science Publ., N.J., p.199.
4. Кудинов, В. В. Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1997. – 184 с.
5. Кулик, А. Я. Газотермическое напыление композиционных порошков. / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин, М. Д. Никитин – М.: Машиностроение, 1995, – 200 с.
6. Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В.В. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.
7. Хасуй, А. Техника напыления / А. Хасуй. – М.: Машиностроение, 1975 – 286 с.
8. Вяльцев, А. М. Синтез керамических материалов для высокоплотных покрытий, в кн.: Получение и исследование свойств новых материалов. / А. М. Вяльцев. – Киев: ИПМ, 1988. – С. 149 – 153.
9. Бузовкина, Т. Б. Исследование теплопроводности и физико-химических характеристик высокотемпературных напыленных покрытий на основе окиси алюминия: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т. Б. Бузовкина. – Ленинград: 1993. – 21 с.

10. Safai, S. Plasma sprayed coating – their ultramicrostructure. T. Advances in surface coating technology, 1998, 1. – P 1-14.
11. Борисов, Ю. С. Применение плазменных покрытий в текстильном машиностроении. – В сб.: Защитные покрытия на металлах / Ю. С. Борисов. – Киев, Наукова думка, 1999. – С. 93 – 95.
12. Оковитый, В. А. Разработка теплозащитных плазменных покрытий / В. А. Оковитый // Сварка и родственные технологии – Минск: Тонпик, 2005. – Вып. 7. – С. 80-82.
13. Оковитый, В. А. Оптимизация процесса нанесения  $ZrO_2$ -  $Y_2O_3$  / В.А. Оковитый // Порошковая металлургия. – Минск: Белорусская наука, 2007. – Вып. 30. – С. 245-249.
14. Оковитый, В. А. Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием / Оковитый В.А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Соболевский С. Б., Оковитый В. В. // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2020. – Вып.6. – С. 615-620.
15. Пантелеенко, Ф. И. Разработка принципов модификации высокоэнергетическим плазменным воздействием покрытий из керамики с применением добавок тугоплавких металлов. / Пантелеенко Ф. И, Оковитый В. А., Девойно О. Г., Сидоров В. А., Оковитый В. В., Асташинский В. М. // Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета “Прогрессивные технологии и системы машиностроения”. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып1(68). – С. 61-66.
16. Пантелеенко, Ф. И. Разработка композиционного материала на основе керамики с применением добавок соединений тугоплавких металлов / Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Оковитый В. А., Сидоров В. А., Рафаил К. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово, 2020. – №4(140). – С.18-24.
17. Пантелеенко, Ф. И. Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый // Минск: БНТУ, 2019. – 231 с.
18. Оковитый, В. А. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический слой NiCr и твердый  $ZrO_2$ ) / Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Храмцов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В., Соболевский С.Б. // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2018. – Вып.1. – С. 21-28.
19. Оковитый, В. А. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой / Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Оковитый В. В. // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2018. – Вып. 3. – С.183-189.

Поступила в редколлегию 16.02.2021 г.



УДК 539.3; 620.1

**П. Б. Северов**

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Россия  
Тел.: +7 (916) 5163999; E-mail: alpinprom@yandex.ru

## ИЗМЕНЕНИЕ КАСАТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЕ - ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

*В статье рассмотрены распределения повреждений в образцах из слоистых углепластиков с целью объяснения нелинейности зависимости «напряжение - деформация» при одноосном растяжении и, в частности, непривычного увеличения касательного модуля указанной зависимости. Для регистрации повреждений применялся метод акустической эмиссии. При квазистатическом растяжении установлена зависимость касательного модуля  $E_x$  диаграммы деформирования от взаимного расположения зоны разрушения материала и зоны измерения деформации. При циклическом растяжении выявлена зависимость касательного модуля  $E_x$  от количества циклов нагружения на участке активного деформирования петли гистерезиса.*

**Ключевые слова:** слоистый углепластик, нелинейность диаграммы деформирования, касательный модуль, акустическая эмиссия, распределение АЭ импульсов.

**P. B. Severov**

## CHANGE IN THE TANGENT MODULUS OF THE STRESS - STRAIN DEPENDENCE UNDER QUASI-STATIC AND CYCLIC LOADINGS OF CFRP LAMINATES

*The article considers damage distributions in samples of CFRP laminates in order to explain the nonlinearity of the stress-strain dependence under uniaxial tension and, in particular, the unusual increase in the tangent modulus of this dependence. The acoustic emission method was used to register the damage. In the case of quasi-static tension, the dependence of the tangent modulus  $E_x$  of the stress-strain diagram on the mutual position of the material failure zone and zone of strain measurement is established. Under cyclic tension, the dependence of the tangent modulus  $E_x$  on the number of loading cycles in the area of active strain of the hysteresis loop is revealed.*

**Keywords:** CFRP laminate, nonlinear stress-strain diagram, tangent modulus, acoustic emission, AE pulse distribution.

### 1. Введение

Композитный материал представляется в качестве эволюционирующей нагружаемой многомасштабной нелинейной динамической системы, обладающей свойством самоорганизованной критичности (стремление к критическому состоянию) в процессе медленной квазистационарной и сверхбыстрой катастрофической стадий эволюции [1].

Упругое нелинейное деформирование графитоэпоксидных образцов с увеличением касательного модуля в момент разрушения на 11 - 13% по отношению к модулю в начальной стадии нагружения отмечено в работе [2]. Увеличение касательного модуля примерно на 10% для однонаправленных композитов, нагруженных вдоль волокон, отмечено также в работе [3], в которой указывается на влияние модуля волокна (его увеличения) на характер зависимости «напряжение – деформация» для отдельного однонаправленного слоя.

Физические принципы, заложенные в методы измерения силы (напряжения  $\sigma$ ) и удлинения (деформации  $\epsilon$ ) при механическом нагружении образца, одинаковы: изменение сопротивления чувствительных элементов силоизмерителя и экстензометра при их деформации. Силоизмеритель реагирует на изменение состояния материала образца во всем его объеме, экстензометр – только в локальном объеме материала в пределах размеров самого экстензометра. Нарушение корреляции между измеряемыми параметрами

механического нагружения  $\sigma$  и  $\varepsilon$  свидетельствует о рассогласовании в поведении части образца по отношению к его целому, то есть, о некой деструкции материала, которая в своем развитии определяет характер кривой деформирования.

## 2. Материалы и методы испытания

Испытания образцов проводились в гидравлических захватах электросервогидравлической установки INOVA ИК-6033. Система сбора и обработки экспериментальной информации на базе электронной аппаратуры и программного продукта фирмы National Instruments США, акустико-эмиссионное оборудование и программное обеспечение фирмы ИНТЕРЮНИС РФ.

Образец №1 вырезан в направлении 0 из слоистого углепластика КМУ-3Л с укладкой  $[0_2/\pm 45^0/0_3/\pm 45^0/0_3/\pm 45^0/0_3/\pm 45^0/0_2]_s$ . Размеры рабочей зоны образца: длина 100 мм, поперечное сечение  $10 \times 5$  мм<sup>2</sup>. Нагружение: квазистатическое одноосное растяжение с постоянной скоростью перемещения захвата 30 мкм/сек. Образец доведен до разрушения, регистрация сигналов акустической эмиссии не проводилась.

Образец №2 вырезан в направлении 0 из слоистого однонаправленного углепластика с укладкой  $[0_{26}]$ . Размеры рабочей зоны образца: длина корсетной части  $\approx 40$  мм, минимальное поперечное сечение  $25,5 \times 4$  мм<sup>2</sup>. Нагружение: квазистатическое одноосное растяжение с постоянной скоростью перемещения захвата 1 мкм/сек. Образец доведен до разрушения, проводилась регистрация сигналов акустической эмиссии [4, 5].

Образец №3 вырезан из слоистого квазиизотропного углепластика  $(0/\pm 45^0/90^0)$ , укладка и направление вырезки образца не установлены. Размеры рабочей зоны образца: длина 140 мм, поперечное сечение  $70 \times 7$  мм<sup>2</sup>. Нагружение: квазистатическое одноосное растяжение с постоянной скоростью перемещения захвата 2 мкм/сек. Образец до разрушения не доведен, проводилась регистрация сигналов акустической эмиссии.

Образец №4 аналогичен образцу №1. Нагружение 1: циклическое растяжение с управлением по силе, частота нагружения  $f = 10$  Гц, максимальное напряжение  $\sigma_x^{\max} = 525$  МПа, минимальное напряжение  $\sigma_x^{\min} = 52,5$  МПа, количество циклов нагружения  $4,37 \times 10^6$ . Нагружение 2: квазистатическое одноосное растяжение, запись петли гистерезиса через каждые  $10^4$  циклов, скорость изменения напряжения  $V\sigma_x \approx 5$  МПа/сек, максимальный уровень напряжения  $\sigma_x^{\max} = 525$  МПа, минимальный уровень напряжения  $\sigma_x^{\min} = 0$  МПа. Образец до разрушения не доведен, регистрация сигналов акустической эмиссии не проводилась.

## 3. Результаты исследования

На рисунках 1, а, б, в для образца №1 представлены (в зависимости от времени) нормированные скорость изменения напряжения  $v\sigma_x$ , скорость деформации  $v\varepsilon_x$ , разность скоростей  $v\sigma_x - v\varepsilon_x$  и продольный касательный модуль  $E_x$ . Разность нормированных скоростей  $v\sigma_x - v\varepsilon_x$  определяет характер нелинейности диаграммы деформирования на различных ее участках:  $v\sigma_x - v\varepsilon_x < 0$  ( $E_x \downarrow$ ) – диаграмма деформирования выпуклая,  $v\sigma_x - v\varepsilon_x = 0$  ( $E_x = \text{const}$ ) – линейная,  $v\sigma_x - v\varepsilon_x > 0$  ( $E_x \uparrow$ ) – вогнутая. Начальный участок диаграммы деформирования образца №1 выпуклый, после точки перегиба – вогнутый (рис. 1(б)). Значительное увеличение  $E_x$  на рис. 1(в) определяется значительным увеличением  $v\sigma_x - v\varepsilon_x$  на рис. 1(б), так как скорость деформации  $v\varepsilon_x$  прогрессирующе отстает от скорости изменения напряжения  $v\sigma_x$  вследствие образования вне зоны экстензометра области локализации процессов разрушения - деформирование по длине образца становится неоднородным [6].

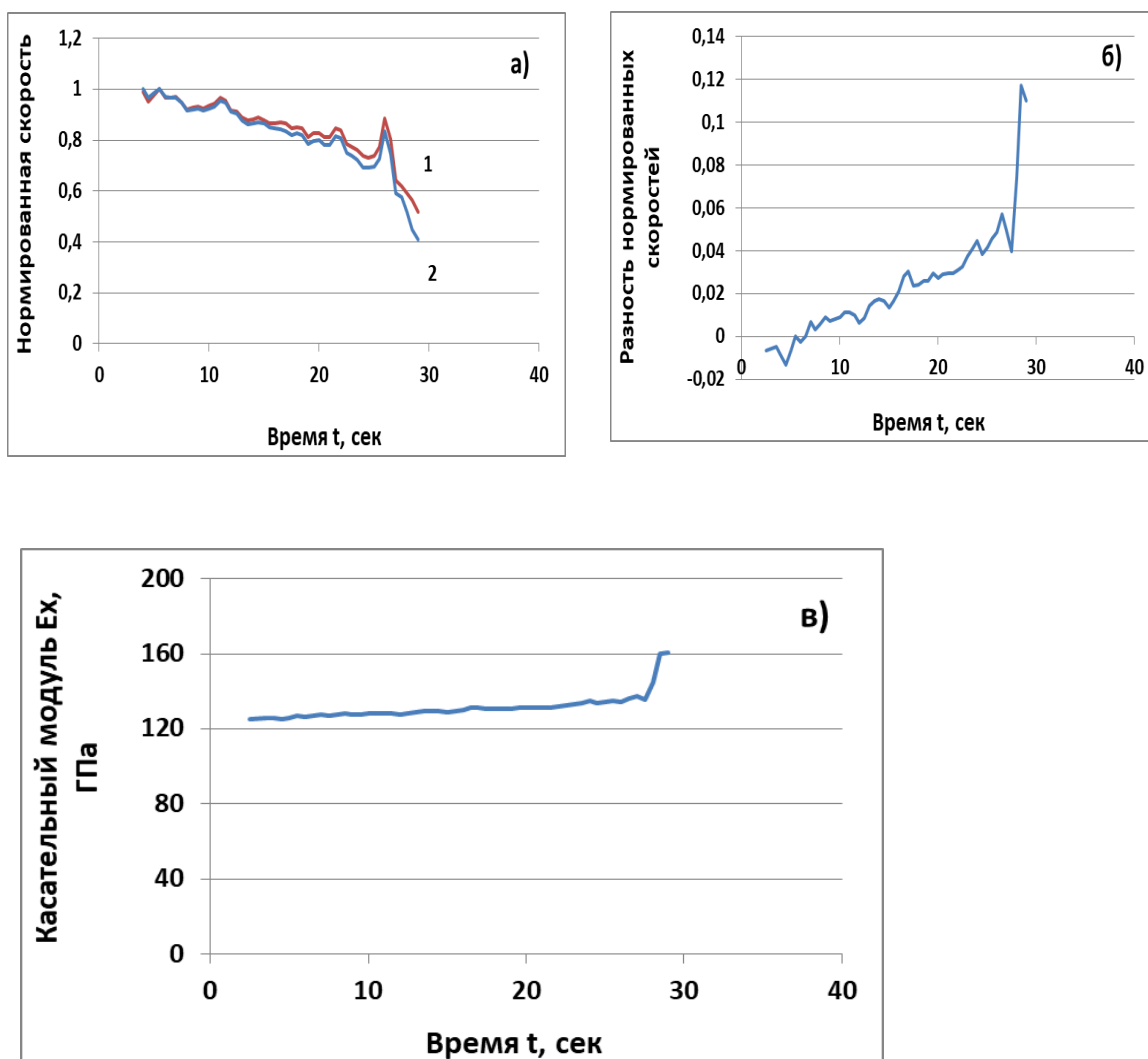


Рисунок 1. Образец №1: а - зависимости нормированных скоростей  $v_{\sigma_x}$  (1),  $v_{\epsilon_x}$  (2) от времени; б - изменение разности нормированных скоростей  $v_{\sigma_x} - v_{\epsilon_x}$  во времени; в - зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от времени

Нелинейность зависимости напряжения от деформации удалось объяснить благодаря сочетанию акустико-эмиссионного метода с классическими методами измерения механических величин в процессе нагружения композитных образцов. На рисунках 2(а), 2(б), 2(в) для корсетного образца №2 представлены зависимости  $v_{\sigma_x}(t)$ ,  $v_{\epsilon_x}(t)$ ,  $E_x(t)$  и распределение акустико-эмиссионных (АЭ) импульсов по длине образца во времени (параллельные линии на рис. 2(в) – координаты ножек экстензометра). Характер поведения касательного модуля  $E_x$  определяется миграцией во времени нагружения зоны максимальной деформационной активности и разрушения по отношению к объему материала, охватываемого экстензометром. При интенсивном развитии деформации и разрушения материала в зоне экстензометра (рис. 2(в)) касательный модуль  $E_x$  уменьшается с явно выраженным трендом к нулевому значению (рис. 2(б)). До этого наклон кривой деформирования сначала незначительно увеличивался, а затем некоторое время

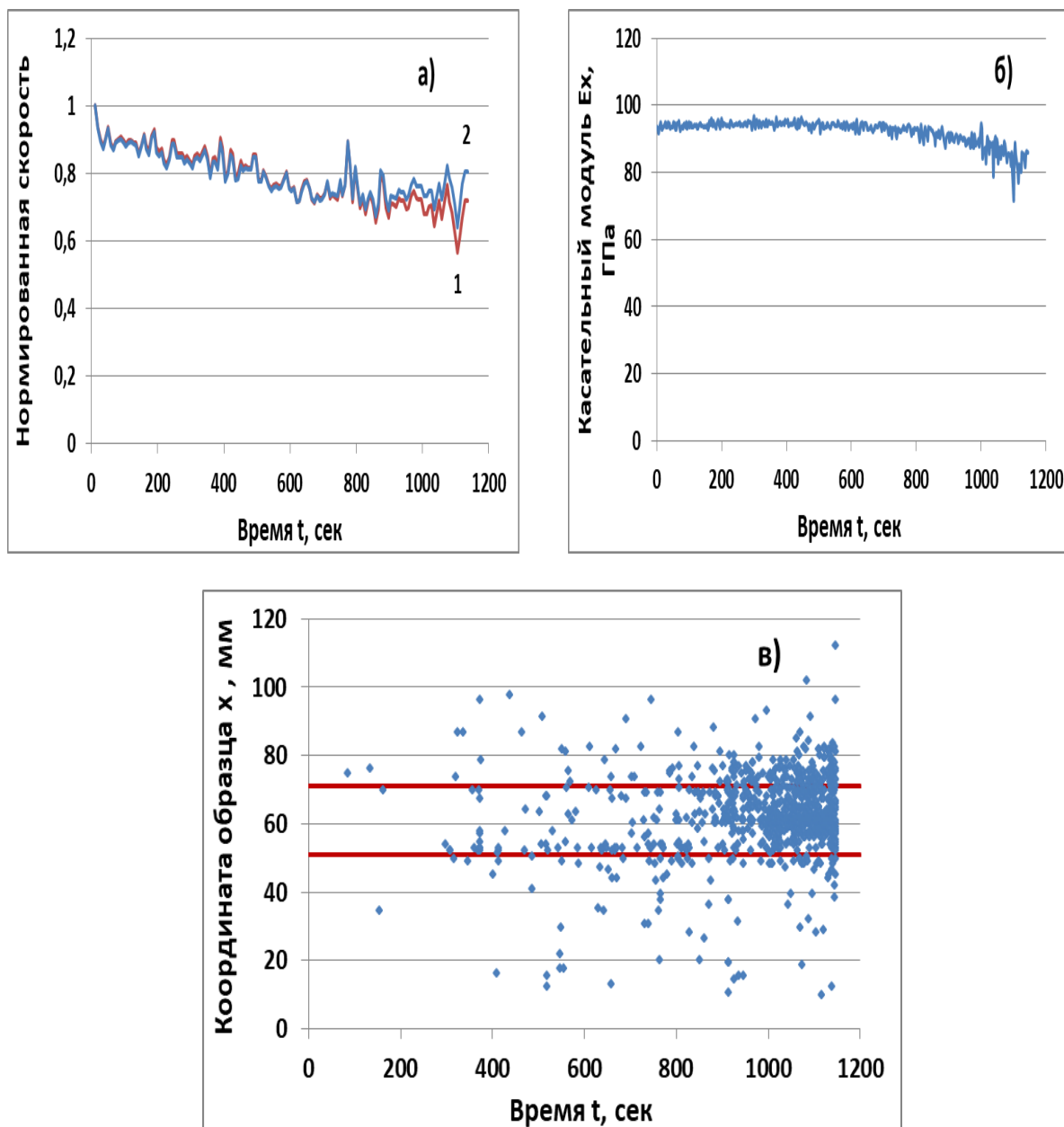


Рисунок. 2. Образец №2: а - зависимости нормированных скоростей  $v\sigma_x$  (1),  $v\epsilon_x$  (2) от времени; б - зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от времени; в - распределение АЭ импульсов по длине образца во времени

оставался постоянным. Такое поведение коррелирует с развитием процесса разрушения образца по его длине во времени, представленного на рис. 2(в), а также соответствует зависимостям  $v\sigma_x(t)$ ,  $v\epsilon_x(t)$  (рис. 2(а)).

На рисунках 3(а), 3(б), 3(в) для образца №3 представлены зависимости, аналогичные образцу №2. Акустико-эмиссионный анализ дает распределение АЭ импульсов по длине образца во времени (рис. 3(в), параллельные линии – координаты ножек экстензометра). В объеме материала, охватываемого экстензометром, наблюдается незначительное количество АЭ событий, свидетельствующих о деформационной активности

и локальных разрушениях. Разность нормированных скоростей  $v\sigma_x - v\epsilon_x > 0$  (рис. 3(а)), касательный модуль  $E_x$  увеличивается (рис. 3(б)), диаграмма деформирования вогнутая.

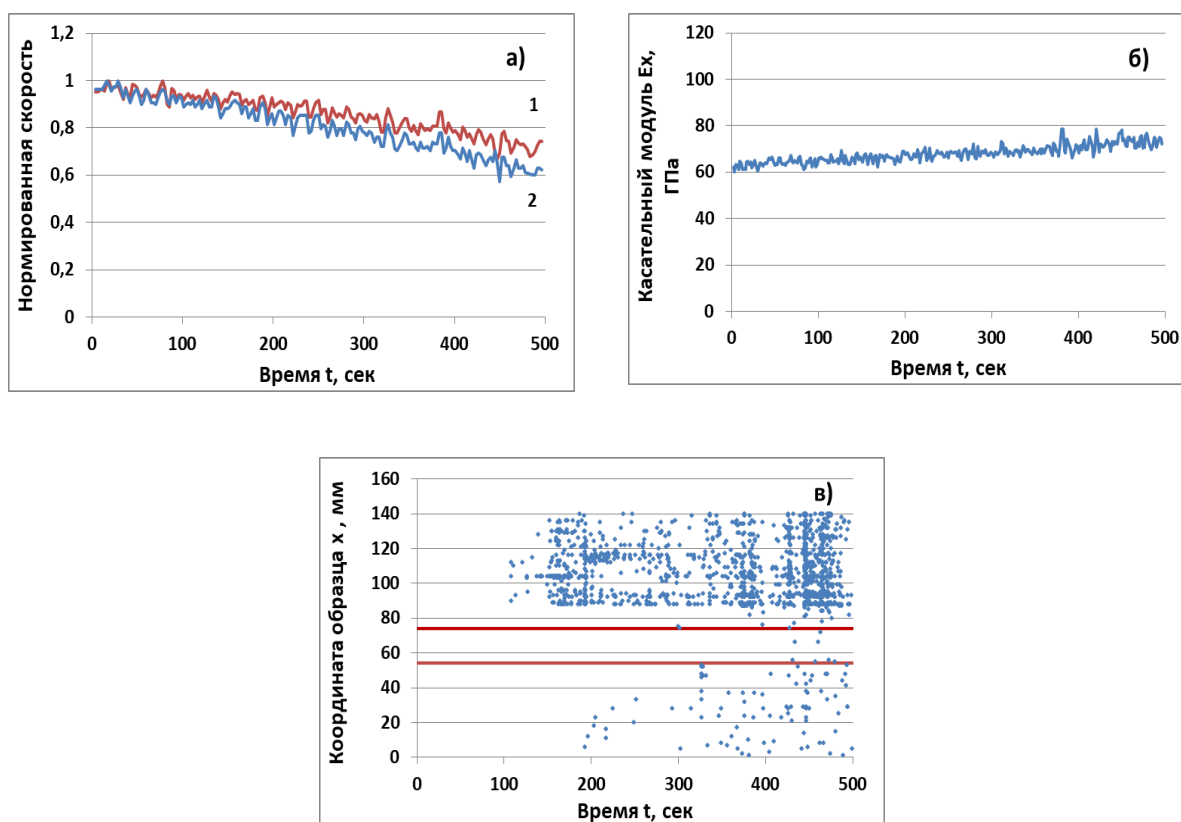


Рисунок. 3. Образец №3: а - зависимости нормированных скоростей  $v\sigma_x$  (1),  $v\epsilon_x$  (2) от времени; б - зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от времени; в - распределение АЭ импульсов по длине образца во времени

Все выше описанные эксперименты проводились при жестком нагружении с постоянными скоростями перемещения захвата. Квзистатическое одноосное растяжение образца №4 проводилось при мягком нагружении с постоянной скоростью изменения напряжения  $V\sigma_x \approx 5$  МПа/сек до максимального уровня напряжения  $\sigma_x^{\max} = 525$  МПа. Зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения для этого образца представлена на рис. 4(а). Довольно значительная выпуклость кривой деформирования на начальном участке ( $E_x \downarrow$ ) через небольшой линейный участок переходит в незначительную вогнутость до конца нагружения ( $E_x \uparrow$ ). На рис. 4(б) приведено сравнение зависимости продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения для двух видов нагружения: жесткого (образец №1 кривая 1) и мягкого (образец №4 кривая 2). Кривые практически совпадают во всем диапазоне напряжений за исключением начальных участков нагружения до  $\sigma_x \approx 150$  МПа. Пока пояснения отмеченному расхождению нет.

В дальнейшем образец №4 подвергся циклическому растяжению (Нагружение 1 в разделе «Материалы и методы испытаний»). Через каждые  $10^4$  циклов записывалась петля гистерезиса (Нагружение 2 там же). Описанное квазистатическое растяжение образца №4 – половина петли гистерезиса №0 при увеличении нагрузки. Петля гистерезиса №0 записана до начала, а петля №437 после завершения циклического нагружения. Результат циклического воздействия на образец представлен на рис. 4(в) в виде сравне-

ния зависимостей продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения при увеличении нагрузки в петлях гистерезиса №0 и №437. С увеличением числа циклов нагружения выпуклость зависимости  $\sigma_x = f(\epsilon_x)$  на начальном участке до  $\sigma_x \approx 150$  МПа постепенно уменьшается и плавно переходит в постепенно увеличивающуюся вогнутость. Вогнутость зависимости  $\sigma_x = f(\epsilon_x)$  при  $\sigma_x > 150$  МПа уменьшается незначительно с увеличением количества циклов нагружения.

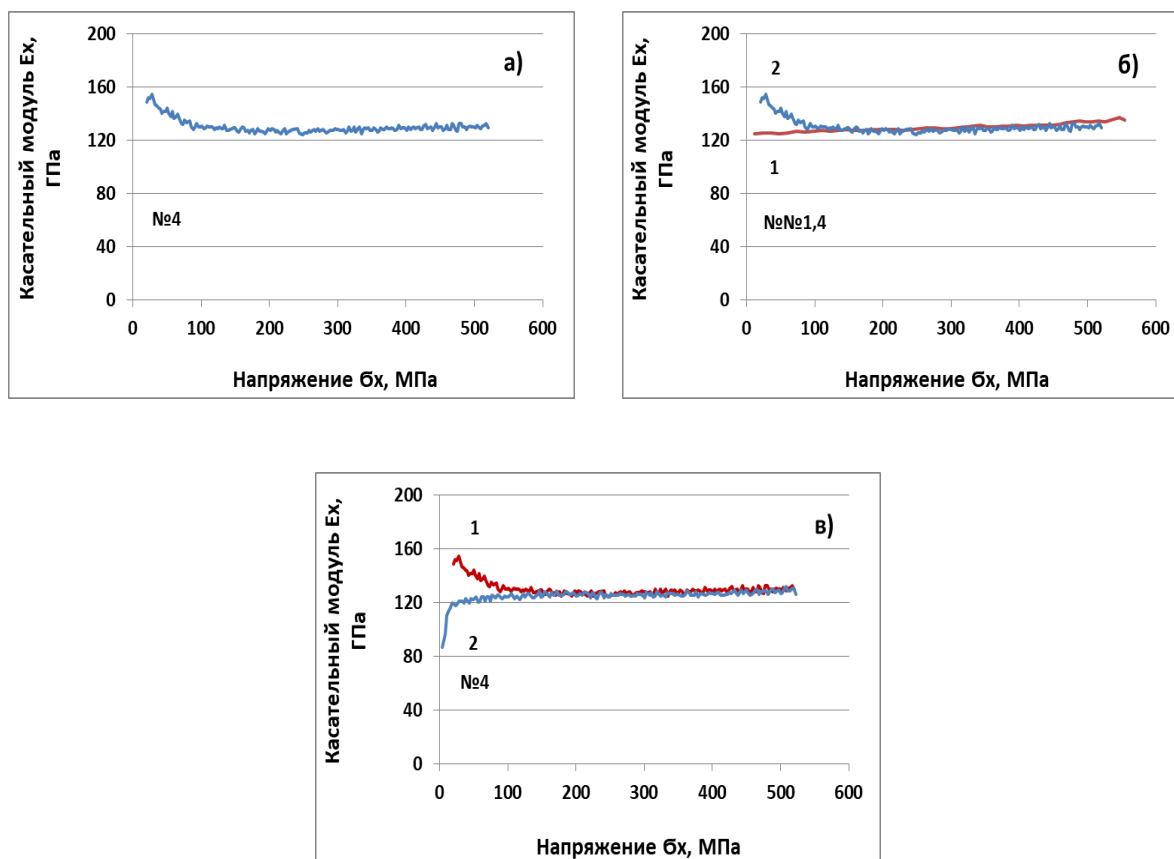


Рисунок 4. Образец №4: а - зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения при мягком нагружении; б - зависимости продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения: образец №1 при жестком (1), образец №4 при мягком (2) нагружениях; в - зависимости продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения в начале (1) и конце (2) циклического нагружения

### 5. Заключение

Проведенные механические эксперименты совместно с акустико-эмиссионными измерениями подтверждают, что незначительные выпуклость или вогнутость кривой деформирования зависят от взаимного расположения зоны деструкции, мигрирующей и развивающейся при квазистатическом растяжении образца, и места закрепления экстензометра на образце: при интенсивном развитии деформаций и разрушений материала в зоне экстензометра касательный модуль уменьшается, в противном случае – увеличивается.

Приведенное пояснение увеличения касательного модуля  $E_x$  нелинейной зависимости напряжения от деформации при одноосном квазистатическом растяжении слоистых углепластиков не поясняет увеличение касательного модуля  $E_x$  при циклическом

нагружении таких углепластиков. Как видно из рис. 4(в), касательный модуль  $E_x$  зависимости  $\sigma_x = f(\varepsilon_x)$ , за исключением начального участка, продолжает увеличиваться даже после нескольких миллионов циклов нагружения. Незначительное накопление повреждений материала в процессе записи петли гистерезиса при увеличении нагрузки после существенного циклического воздействия не позволяет утверждать, что увеличение касательного модуля  $E_x$  определяется интенсивным развитием деформаций и разрушений материала вне зоны экстензометра. Вопрос сохранения вогнутости петли гистерезиса (увеличения касательного модуля) при циклическом нагружении остается открытым.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Макаров, П. В. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред / П. В. Макаров, М. О. Еремин // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. №1. – С. 5-26.
2. Лагас, П. А. Нелинейный характер зависимости “напряжение – деформация” для слоистых графитоэпоксидных пластиков // Аэрокосмическая техника. – 1986. – №4. – С. 102-111.
3. Sendekyj, G. P. Fracture Behavior of Thornel 300/5208 Graphite-Epoxy Laminates – Part 1: Unnotched Laminates / G. P. Sendekyj, M. D. Richardson, J. E. Pappas // Composite Reliability, ASTM STP 580. – 1975. – Pp. 528-546.
4. Северов, П. Б. Оценка механического состояния слоистых углепластиков по акустико-эмиссионному отображению процессов неупругого деформирования и разрушения / П. Б. Северов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – №4. – С. 85-92.
5. Северов, П. Б. Деформирование и разрушение однонаправленных слоистых углепластиков по данным акустической эмиссии / П.Б. Северов // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. – Уфа, 2019. – С. 776-778.
6. Severov, P.V. Experimental Studies on Mechanical Behavior of Carbon Fiber Laminates under Static and Cyclic Loading / P.V. Severov, A. M. Dumanskii // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, No. 5. – Pp. 435-438.

Поступила в редколлегию 04.02.2021г.

УДК 621.833

**В. А. Сидоров**, д-р техн. наук, проф., **В. П. Цокур**, канд. техн. наук, доц.  
Донецкий национальный технический университет, ДНР  
Тел./Факс: +38(0623010731; E-mail: viktor.cokur@yandex.ua

## ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРОМЕТРИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ СТАНКОВ С ЧПУ

*В статье приведены результаты измерения параметров вибраций шпинделя станка с ЧПУ, что позволило выявить дефекты подшипников. Анализ полученных значений виброскорости и виброускорения при различных частотах вращения шпинделя позволил установить связь составляющих спектра с повреждениями в подшипниках. Приведен алгоритм диагностики технического состояния механической системы станка с ЧПУ*

**Ключевые слова:** шпиндель, вибрации, подшипник, виброскорость, виброускорение.

V. A. Sidorov., V. P. Tsokur

### VIBROMETRY CAPABILITIES FOR TECHNICAL MAINTENANCE OF CNC MACHINES

*The article shows the measurement results vibration parameters of the spindle of the CNC machine, which allowed to identify bearing defects. Analysis of the obtained values of vibration velocity and vibration acceleration at various spindle speeds made it possible to establish a connection between the components of the spectrum and damage in the bearings. An algorithm for diagnosing the technical state of the mechanical system of a CNC machine tool is presented.*

**Keywords:** spindle, CNC machine, mechanical system, vibration

#### 1. Введение

Производительная и качественная работа станков с ЧПУ является комплексной проблемой и зависит от взаимодействия электрической, механической, системы программного управления и оператора. Некоторые аспекты этого взаимодействия рассматривались в работах: [1] – выполнен анализ погрешностей элементов 5-ти осевого станка с ЧПУ и корректировка перемещений по осям с помощью оптических датчиков, [2] – анализ динамического поведения шпинделя на обрабатывающем центре с ЧПУ, [3] – рассмотрены средства и методы автоматической диагностики системы при механической обработке, [4] – проведен анализ вибраций и определены возможности диагностирования неисправностей и др. Механическая часть станка с ЧПУ может являться причиной последующих повреждений системы контроля и измерения. Раннее обнаружение повреждений механической части обеспечивает минимальные затраты для восстановления работоспособности при условии своевременного проведения ремонта. Возможные решения данной задачи рассматривались в работах [5, 6]. Существуют предложения об установке стационарной системы вибродиагностики на станок с ЧПУ, например, приведенные в работах [7].

Известным фактом, является использование контроля вибрации, в частности спектрального анализа для обнаружения повреждений механических элементов. Приложение методов виброметрии, с учётом особенностей металлорежущих станков рассматривались ранее в работах [8, 9], результаты диагностирования технического состояния металлорежущих станков указывают на наличие некоторых особенностей при оценке технического состояния подшипниковых узлов. Определение связи параметров вибросигнала с состоянием подшипниковых узлов является актуальной задачей.



Целью работы является исследование возможности виброметрии при техническом обслуживании станков с ЧПУ, как одной из возможностей информационных технологий, обеспечивающей повышение безотказности оборудования и качества изготавливаемых деталей.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Исследования проводили на станках, внешний вид которых показан на рис. 1. Первые отклонения в работе металлорежущих станков наиболее часто регистрируются при помощи органолептических методов – изменяется характер звука на холостом ходу и при обработке появляется вибрация или повышается температура узлов станка. Сравнительный анализ характера шума не позволяет локализовать место повреждения из-за наличия релаксационных шумов и субъективности метода.



Рисунок 1. Общий вид токарного станка с ЧПУ GLS-200M (а) и горизонтального обрабатывающего центра FRITZ WERNER TC 1.4 C (б)

Возможное решение - измерение общего уровня вибрации проводилось в фиксированных частотных диапазонах: виброскорость – среднеквадратичное значение в диапазоне (СКЗ) 10...1000 Гц; виброускорение – пиковое (ПИК) и среднеквадратичное (СКЗ) значения в диапазоне 10...5000 Гц.

Результаты взаимной оценки исправного и неисправного станков по значению виброскорости при частоте вращения 2000 об/мин в одинаковом режиме работы показаны в таблице 1 - значения низкие, имеют равный порядок, за исключением осевого направления. Это позволяет предположить наличие неисправности в одном из шариковых радиально-упорных подшипников.

Таблица 1. Результаты измерения виброскорости в контрольных точках станков.

Точка измерения	Среднеквадратичное значение виброскорости (мм/с), для направлений измерения, частотный диапазон 10... 1000 Гц		
	Вертикальное	Горизонтальное	Осевое
1	0,26 (0,20)	0,19 (0,18)	0,32 (0,04)
2	0,24 (0,22)	0,14 (0,15)	0,34 (0,05)

Примечание: в скобках значения для шпинделя без постороннего звука.

При значительных повреждениях значения общего уровня вибрации могут быть значительными. Это подтверждают результаты, приведенные в таблице 2. Измерения выполнены в контрольных точках: 1 – стол станка; 2 – шпиндель станка; 3 – подшипник двигателя свободный; 4 – зажимное устройство – радиальное направление; 5 – зажимное устройство – осевое направление.

Таблица 2. Значения параметров вибрации для контрольных точек станка FRITZ WERNER TC 1.4 C

Точка измерения	Виброскорость, мм/с холостой ход	Виброскорость, мм/с рабочий ход	Виброускорение СКЗ/ПИК, м/с <sup>2</sup> холостой ход
1	0,05	0,4	0,1/0,4
2	0,2	1,6	1,2/11,7
3	0,5	1,9	1,7/5,8
4	5,8	9,2	2,6/11,3
5	2,4	3,9	6,9/25,9

Анализ результатов показывает:

- значения виброскорости при работе под нагрузкой увеличиваются;
- наибольшее значение виброскорости и виброускорения зафиксировано на зажимном устройстве в точках 4 и 5 на холостом и рабочем ходу;
- наименьшее значение виброскорости и виброускорения зафиксировано на столе в точке 1 на холостом и рабочем ходу.

Следующий этап – установление зависимостей. При изменении частоты вращения шпинделя от 500 об/мин до 3000 об/мин в режиме холостого хода были установлены зависимости изменения параметров вибрации (рис. 2). Для параметра виброскорости (рис. 2, а) характерны линейные зависимости с различным углом наклона для роликового и шариковых подшипников. Следовательно, это не дисбаланс, для которого характерны квадратичные зависимости, а механические повреждения подшипников.

Зависимости виброускорения (рис. 2, б) остаются линейными для шариковых и становятся нелинейными для роликового подшипника. Это указывает на взаимное влияние подшипниковых узлов при проявлении диагностических признаков повреждений.

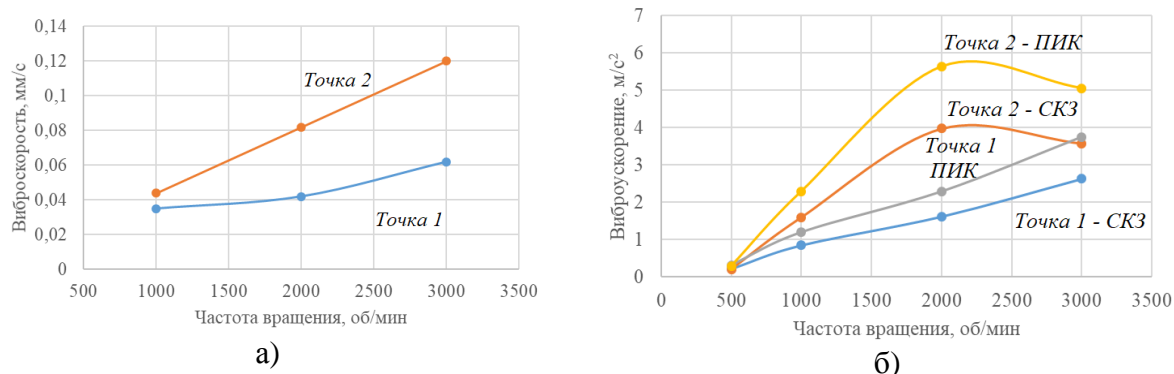


Рисунок 2. Зависимости изменения параметров вибрации от частоты вращения:  
а - виброскорость; б - виброускорение

Спектральный анализ наиболее эффективен для идентификации вида повреждения. Однако на различной частоте повреждение создаёт различный спектр составляющих виброускорения. Смещаются оборотные частоты и гармоники, изменяется расположение боковых полос и глубина модуляции (рис. 3).

При частоте вращения 500 об/мин (рис. 3а) в спектре присутствует модуляция сигнала частотой 83 Гц – 10-я гармоника оборотной частоты. Увеличение частоты вращения шпинделя до 1000 об/мин приводит к модуляции сигнала частотой 164 Гц - 10-я гармоника оборотной частоты. Значения виброускорения становятся нестабильными. частота вращения 2000 об/мин – в спектре присутствует модуляция сигнала частотой 328 Гц - 10-я гармоника оборотной частоты. присутствует модуляция частотой 16 Гц – частота вращения сепаратора. на частоте вращения 3000 об/мин в спектре виброускорения присутствует модуляция сигнала частотой 494 Гц - 10-я гармоника оборотной частоты и модуляция частотой 22 Гц – частота вращения сепаратора.

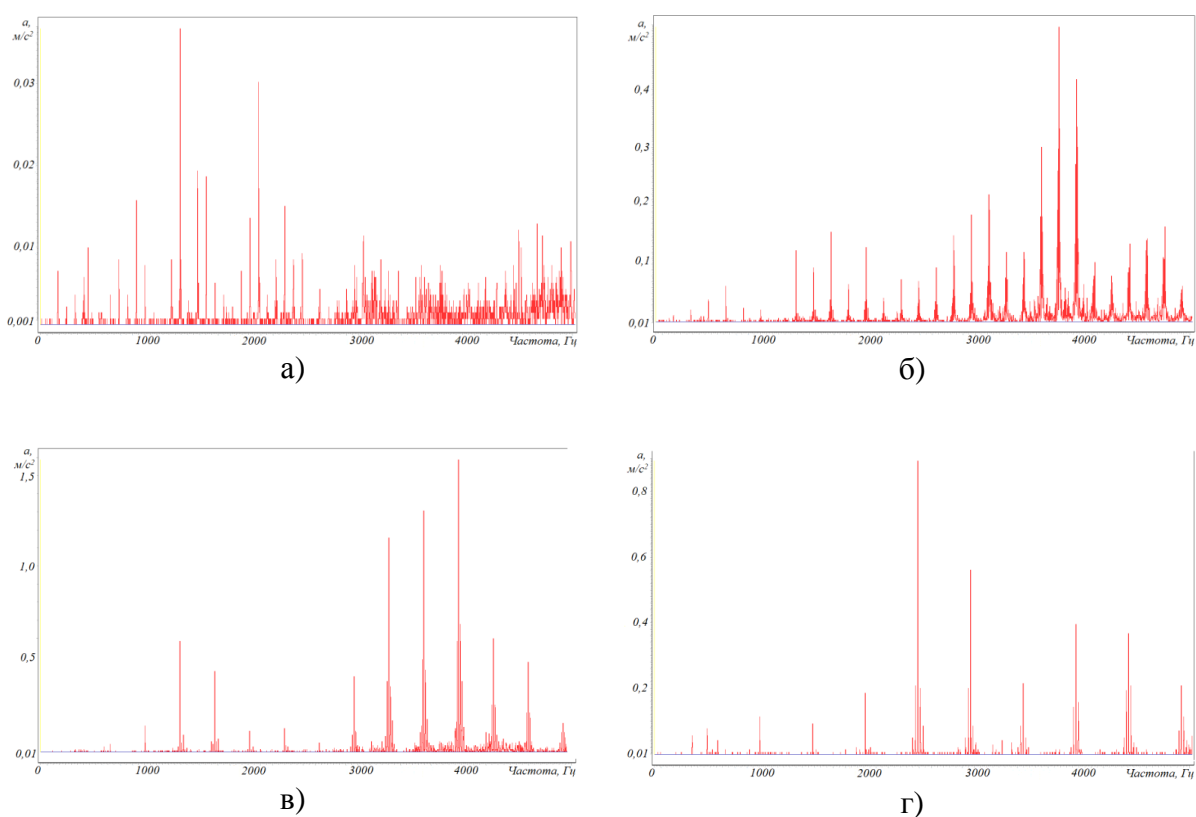


Рисунок 3. Изменения составляющих спектра виброускорения при различной частоте вращения шпинделя: а - 500 об/мин; б - 1000 об/мин; в - 2000 об/мин; г - 3000 об/мин

Наличие гармонических составляющих обычно не характерно при повреждениях подшипников. Расчёт информативных частот (таблица 3) возможных повреждений подтвердил наличие только частоты, связанной с вращением сепаратора.

В результате вибрационного исследования сделаны следующие выводы:

- увеличение значений виброскорости пропорционально изменению частоты вращения;
- значения виброускорения различны для направлений, большие значения виброускорения зафиксированы в районе роликоподшипника;
- отклонения в работе подшипников качения.

Диагноз – состояние привода станка – плохое, эксплуатация в длительном временном интервале не рекомендуется, необходима ревизия блока подшипников шпинделя.

Таблица 3. Информативные частоты (Гц) возможных повреждений подшипников 3018 и 7020 при различной частоте вращения.

Повреждения	Частота вращения, об/мин			
	500	1000	2000	3000
Перекатывание по наружному кольцу	101,4/81,3	202,7/162,6	406,5/326,2	610,4/489,9
Перекатывание по внутреннему кольцу	122,8/101,3	245,5/202,6	492,6/406,4	739,6/610,1
Вращение тел качения	42,9/33,9	85,9/68,0	172,5/136,4	258,9/204,8
Вращение сепаратора	3,7/3,7	7,5/7,4	15,1/14,8	22,6/22,3
Изменение формы тел качения	16,4/16,4	32,9/32,7	66,0/65,6	99,1/98,5
Оборотная частота	8,3	16,6	33,3	50,0

Составляющие спектра вибрации, полученные при исследовании станка FRITZ WERNER TC 1.4 C содержали (рис. 4): гармоники до 24-й оборотной частоты – наличие металлического контакта; преобладают 2-я и 4-я гармоники – перекос, изгиб вала; присутствуют субгармоники и их модуляции – наличие зазоров; не стабильный спектр – металлический контакт; негармонические составляющие – отклонения в работе подшипников.

Поставленный диагноз - состояние привода станка – плохое, эксплуатация в длительном временном интервале не рекомендуется, необходим осмотр подшипников шпинделя и элементов зажимного устройства.

Заключительным этапом диагностирования является визуальный осмотр, в первую очередь подшипников, при котором определяются проявления зафиксированных повреждений. Так в результате осмотра подшипников шпинделя станка с ЧПУ GLS-200M установлено наличие следующих повреждений (рис. 5): следы проворота наружного кольца в корпусе, по торцевым поверхностям, следы ослабления посадки по валу, следы окисления в виде полосы светло коричневого цвета, которые являются признаком нарушения свободы вращения тел качения.

Таким образом, замена подшипников проведена на ранней стадии – макроповреждения, на деталях подшипника, отсутствуют; на беговых дорожках колец присутствуют следы окислительного износа и микроцарапины расположенные по направлению движения. Причиной повышенной вибрации подшипникового узла шпинделя стало вращение тел качения по одной оси при фиксации тел качения из-за накопления продуктов износа смазочного материала в окнах сепаратора. Колебания наиболее загрязнённого подшипника передавались по валу относительно податливой «О»-

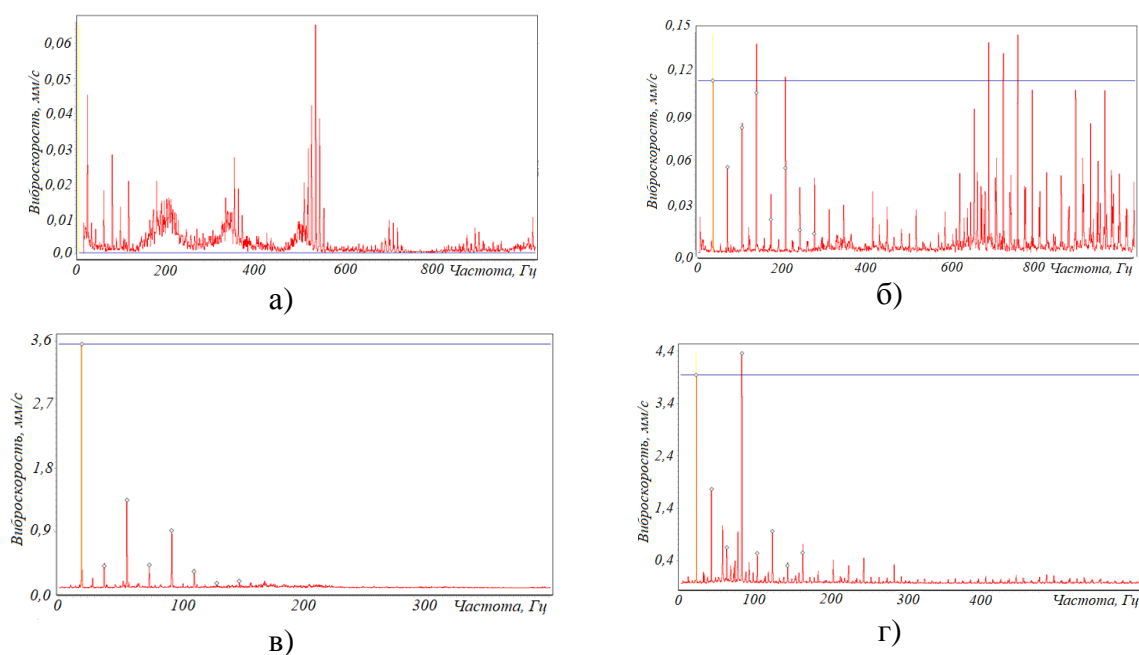
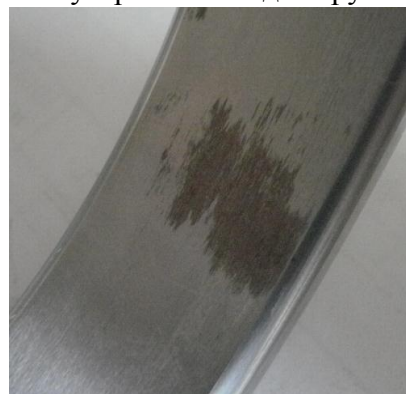


Рисунок 4. Изменения составляющих спектра виброскорости:

- а) шпиндель – холостой ход; б) шпиндель под нагрузкой;
- в) зажимное устройство – холостой ход; г) зажимное устройство под нагрузкой



а)



б)

Рисунок 5. Повреждения подшипников шпинделя станка GLS-200M:

- а - следы проворота наружного кольца в корпусе; б - следы ослабления посадки по валу.

образной пары на роликовый подшипник, имеющий более строгие допуски по возможности компенсации угловых отклонений.

Прикладным использованием методов виброметрии можно считать возможность уравнивания приспособлений в жёстких шпинделях станков. Динамическое уравнивание приспособления (рис. 6) для механической обработки деталей проведено в опорах станка с ЧПУ GLS-200M.

Приспособление представляло собой ассиметричную конструкцию, уравновешенную в процессе проектирования и после изготовления статически. Однако, расчётная частота вращения 3000 об/мин достигнута не была из-за повышенной вибрации на частоте 1000 об/мин. Уравнивание приспособления, установленного на станке, проведено в три этапа. Первоначальная вибрация 1,8 мм/с на частоте вращения

1000 об/мин, была принята в качестве предельно допустимой не оказывающей существенного влияния на измерительную систему станка.

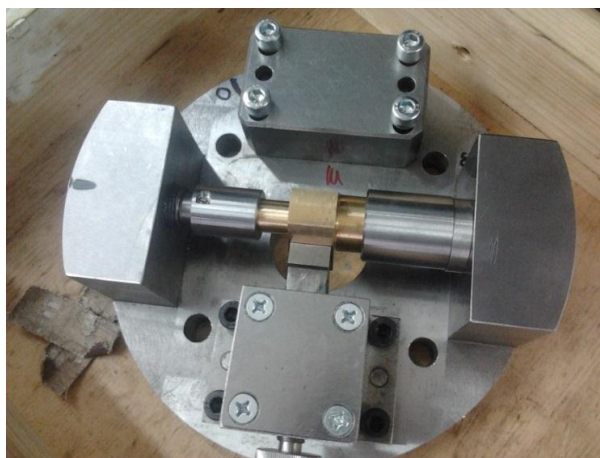


Рисунок 6. Приспособление для механической обработки деталей

Уравновешивание, проведенное на частоте 1000 об/мин, позволило увеличить частоту вращения до 1500 об/мин, а следующее уравновешивание предоставило возможность разогнать шпиндель до частоты 2000 об/мин. Для установки пробного и компенсирующих грузов были использованы технологические отверстия приспособления. В результате уравновешивания удалось достигнуть значения виброскорости 0,2 мм/с при частоте вращения 2500 об/мин. Проведенные исследования показали необходимость дополнения конструкции приспособления местами для размещения компенсирующих грузов.

На основании изложенных подходов, в дополнение к рекомендациям, приведенным в работах [10, 11, 12] предлагается алгоритм проведения диагностирования технического состояния электромеханической системы (ЭМС) станка (рис. 7).

Особое внимание следует обратить на зону взаимодействия, в которой происходит электромеханическое преобразование энергии – электрическая энергия преобразуется в механическую. Текущие электрические мощность, ток, электромагнитный момент преобразуются в механическую мощность на валу (значения момента и частоты вращения).

Если со стороны механизма, исполнительного органа имеет место повышение нагрузки, то это находит свое отражение в росте токовых значений, развиваемого двигателем момента, температуре нагрева двигателя. Механическая часть реагирует на рост нагрузок увеличением упругого момента в соединительных звеньях, ростом усталостных повреждений, увеличением момента сопротивления и снижением скорости движения исполнительных звеньев.

Зафиксированные перегрузки механические и электрические проходят несколько этапов сравнения и оценки. В первую очередь оценивается уровень перегрузок, а далее сигналы проходят через детерминаторы воздействий и блоки критериев состояния – это даёт возможность принять решение о продолжении работы ЭМС, о продолжении работы с допустимыми перегрузками.

В тех случаях, когда отклонения от допустимых, выбираются ремонтные воздействия и после их реализации, проверки качества проведенного ремонта и устранения всех повреждений даётся разрешение на продолжение эксплуатации объекта.



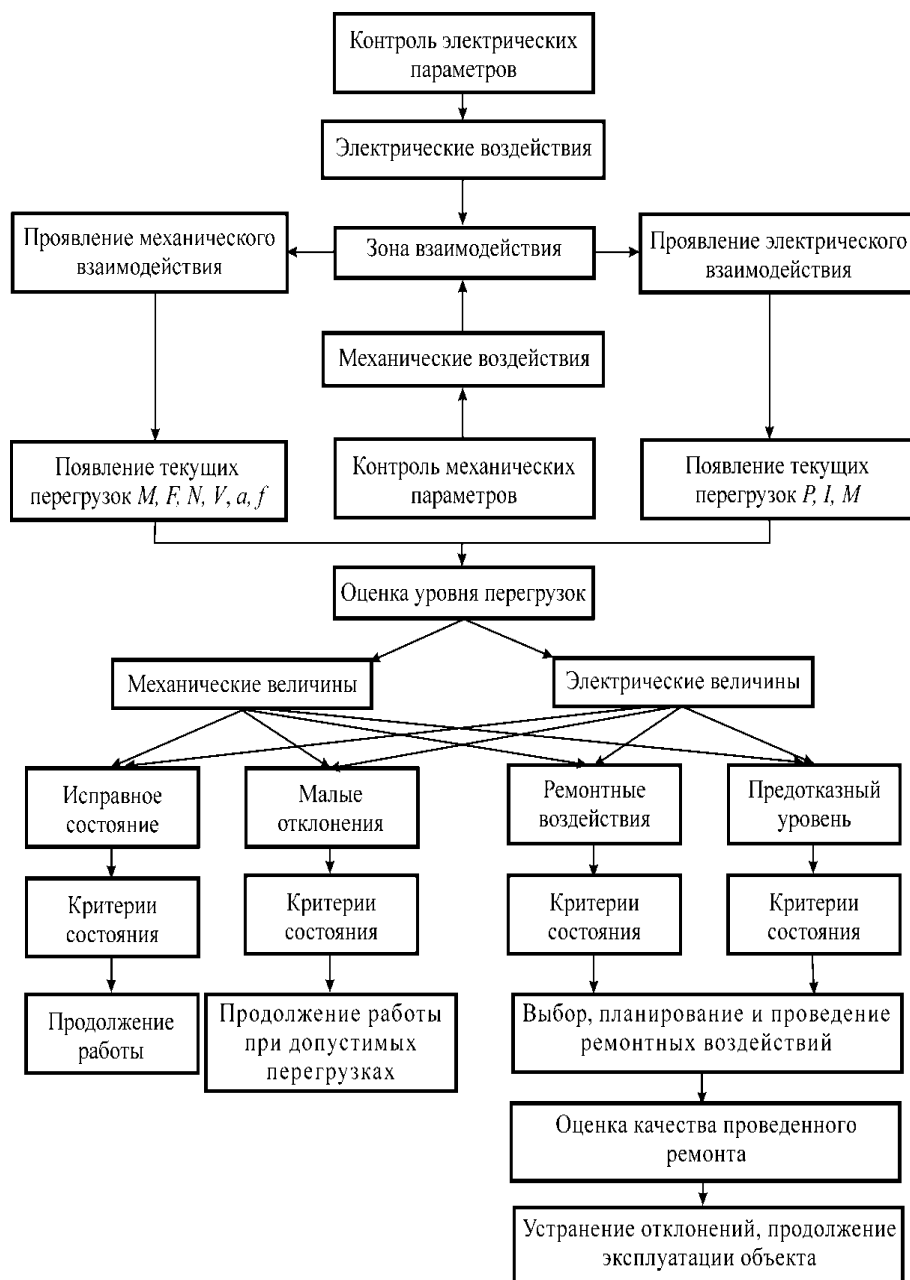


Рисунок 7. Блок-схема электромеханической системы (ЭМС) станка

Проверка качества ремонтной операции осуществляется при режиме холостого хода, а далее при работе под нагрузкой. Необходимо разработать оперативные методы активного воздействия на техническое состояние, позволяющие предупредить возникновение отказа.

### 3. Заключение.

Предлагаемый алгоритм оценки технического состояния ЭМС учитывает реальное состояние объекта на основе измерения параметров вибрации, определяет необходимое упреждающее ремонтное воздействие с последующей оценкой качества ремонта, определяя на основании этого возможность дальнейшей эксплуатации системы.

Результаты одноплоскостной динамической балансировки приспособления для механической обработки в опорах станков показывают на возможность эффективного

снижения дисбаланса с использованием современных анализаторов вибрации по стандартной методике уравнивания и снижения среднеквадратического значения виброскорости (в частотном диапазоне 10...1000 Гц), до уровня 0,2 мм/с, что значительно ниже допустимых значений регламентирующих вибрацию стандартов.

Статическое уравнивание металлорежущего инструмента и приспособлений для механической обработки не позволяет достичь необходимой точности уравнивания. Доказательство данного утверждения заключается в возможности снижения составляющих от дисбаланса до уровня 0,02 мм/с при динамическом уравнивании, что соответствует требованиям обеспечения высокого качества обрабатываемой поверхности при частотах вращения свыше 2000 об/мин. В механотронной системе станков наряду с системами вибрационного контроля должны быть предусмотрены системы регулирования вибрации. Например, система автоматической компенсации дисбаланса, что позволит увеличить срок службы инструмента и станка в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01101528/document>.
2. Analyse du comportement dynamique d'une broche de machine-outils <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00660867/document>.
3. Systèmes de surveillance automatique en usinage: Moyens et methods [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/52148/a\\_IU3P65K3.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/52148/a_IU3P65K3.pdf?sequence=1).
4. Surveillance vibratoire et maintenance predictive. <http://silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-B/ET22A/Ressources/r6100.pdf>.
5. Фельдштейн, Е. Э. Обработка деталей на станках с ЧПУ: учеб. пособие / Е.Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 3-е изд., доп. – Минск: Новое знание, 2007. – 299 с.
6. Система мониторинга вибраций (VCM) для станков с ЧПУ. [http://www.omative.com/image/users/.173890/ftp/my\\_files/Russian/Documents/TechSpec\\_Config/TechSpec\\_for\\_VCM\\_Russian.pdf](http://www.omative.com/image/users/.173890/ftp/my_files/Russian/Documents/TechSpec_Config/TechSpec_for_VCM_Russian.pdf)
7. Система мониторинга вибраций (VCM) для станков с ЧПУ. [http://www.omative.com/image/users/173890/ftp/my\\_files/Russian/Documents/TechSpec\\_Config/TechSpec\\_for\\_VCM\\_Russian.pdf](http://www.omative.com/image/users/173890/ftp/my_files/Russian/Documents/TechSpec_Config/TechSpec_for_VCM_Russian.pdf).
8. Сидоров, В. А. Уравнивание в опорах станков / В. А. Сидоров / «Вестник современных технологий». Сборник научных трудов ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». – Вып. №6. – 2017. – С. 56 – 61.
9. Сидоров, В. А. Диагностирование подшипников шпинделя станка с ЧПУ / В. А. Сидоров / «Вестник современных технологий». Сборник научных трудов ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет. – №1(9). – 2018. – С. 58-63.
10. Шпак, В. Неполадки модернизированных станков с ЧПУ: советы и рекомендации профессионалов / «Техническое обслуживание и ремонт». – №3. – 2010. – С. 47-52. (Неполадки модернизированных станков с ЧПУ. <http://stepmotor.ru/nepoladki>).
11. Методы поиска неисправностей работы станков с ЧПУ. <http://delta-grup.ru/bibliot/7k/40.htm>.
12. Неисправности шпинделя и способы их устранения (список проблем и решений). <http://cncmotors.ru/articles/neispravnosti-shpindelja-i-sposoby-ix-ustraneniya-spisok-problem-i-reshenij>.

Поступила в редколлегию 03.02.2021 г.



УДК 621.838.222

**М. П. Шишкарев**, д-р техн. наук, доц.

Донской государственный технический университет, РФ

Тел.: 89081933393; E-mail: [shishkarev\\_m\\_p@mail.ru](mailto:shishkarev_m_p@mail.ru)

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ

*В статье приведены результаты исследования разработанного способа повышения номинальной нагрузочной способности и точности срабатывания модернизированной адаптивной фрикционной муфты с одноконтурной отрицательной обратной связью. Способ основан на выключении обратной связи, по меньшей мере, при настроечном значении коэффициента трения. Доказано, что отключение действия обратной связи при минимальном значении коэффициента трения позволяет повысить настроечный вращающий момент и точность срабатывания муфты.*

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, настроечный вращающий момент, точность срабатывания, коэффициент усиления, коэффициент трения.

**M. P. Shishkarev**

### METHOD FOR IMPROVING THE PERFORMANCE OF AN ADAPTIVE FRICTION CLUTCH

*The article presents the results of the study of the developed method for increasing the rated load capacity and the accuracy of the operation of the upgraded adaptive friction clutch with a single-circuit negative feedback. The method is based on switching off the feedback, at least at the set value of the coefficient of friction. It is proved that disabling the feedback action at the minimum value of the coefficient of friction allows you to increase the tuning torque and the accuracy of the clutch operation.*

**Keywords:** adaptive friction clutch, tuning torque, actuation accuracy, gain, friction coefficient.

#### 1. Введение

В работах [1, 2] показано, что все конструкции адаптивных фрикционных муфт (АФМ) первого поколения построены по схеме одноконтурной отрицательной обратной связи, независимо от конструктивного исполнения управляющего устройства (УУ), математические модели их номинальной нагрузочной способности и точности срабатывания описываются одинаковыми функциональными зависимостями.

При изменении значения коэффициента трения в 1,5 раза (от минимального до максимального значения) значение коэффициента точности [3] составляет 1,16. Указанная точность срабатывания получена при значении коэффициента усиления (КУ) обратной связи, равном 10, что указывает на резкое снижение номинальной нагрузочной способности АФМ – при значении среднего (расчетного) коэффициента трения  $f_{cp} = 0,3$  значение вращающего момента муфты меньше вращающего момента предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, т. е. без УУ, в 4 раза.

Относительно невысокая точность срабатывания АФМ первого поколения является следствием действия отрицательной обратной связи во всем интервале значений коэффициента трения, в том числе при его минимальном значении.

При настройке муфты на передачу номинального вращающего момента по минимальному значению коэффициента трения [4, 5, 6] указанное обстоятельство является причиной низкой номинальной нагрузочной способности АФМ.

**Цель исследования:** Разработка и исследование способа повышения номинальной нагрузочной способности и точности срабатывания АФМ первого поколения.

**Задачи исследования:** 1. Разработка способа повышения минимального вращающего момента АФМ первого поколения. 2. Разработка принципиальной схемы УУ

обратной связи за счет обеспечения дифференцированного значения коэффициента усиления (КУ). 3. Определение оптимального соотношения между усилиями замыкающих пружин и коэффициентами осевой жесткости.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Выявленные причины низкой точности срабатывания и номинальной нагрузочной способности АФМ первого поколения позволяют разработать способ устранения указанных недостатков, который заключается в увеличении номинального (настроечного) вращающего момента без изменения значения силы натяжения замыкающей пружины (группы замыкающих пружин) и геометрических параметров муфты.

Реализация данного способа основана на выключении функционирования обратной связи, по меньшей мере, при минимальном (настроечном) значении коэффициента трения [4]. Технически данный способ воплощен в виде принципиальной схемы АФМ, показанной на рис. 1, а.

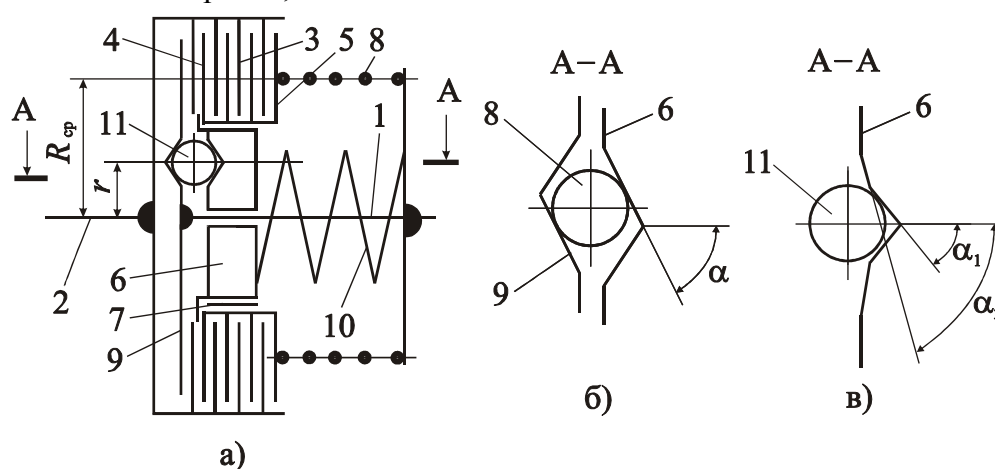


Рисунок 1. Принципиальная схема модернизированной АФМ первого поколения.

Полумуфты 1 и 2 кинематически связаны одна с другой при помощи фрикционной группы, состоящей из дисков трения 3 и 4. Диски 3 соединены с барабаном полумуфты 2, диски 4 – со ступицей нажимного диска 5, который установлен на втулке 6 и связан с ней в окружном направлении при помощи шпонки 7.

Втулка 6 установлена на ступице полумуфты 1, и кинематически не связана с ней в окружном направлении, за исключением незначительного трения, которое не будет учитываться в дальнейших математических выкладках.

Силовое замыкание элементов трения фрикционной группы осуществляется при помощи пружины 8. Втулка 6 поджата в направлении упорного диска 9, закрепленного на ступице полумуфты 1, при помощи пружины 10.

Муфта состоит из тел качения 11, которые расположены в скошенных гнездах упорного диска 9 и втулки 6 (рис. 1, б). На левом торце втулка 6 имеет заплечик, который ограничивает ее осевое перемещение вправо относительно нажимного диска 5.

Если полумуфта 1 является ведущей, то вращающий момент передается телами качения 11, втулкой 6, шпонкой 7, нажимным диском 5, дисками 3 и 4 (за счет трения) на полумуфту 2. В результате взаимодействия тел качения 11 с боковыми скошенными стенками гнезд возникает осевая сила  $F_p$  (распорная сила) как одна из составляющих силы нормального давления в точках контакта (рис. 1, б), которая уменьшает действие силы натяжения пружины 8 на пары трения фрикционной группы.

Благодаря этому осуществляется процесс автоматического регулирования момента сил трения между элементами фрикционной группы в зависимости от значения коэффициента трения и передаваемой нагрузки.

Принцип работы муфты основан на том, что при минимальном значении коэффициента трения распорная сила на телах качения 11 уравнивается силой натяжения пружины 10 (силой трения между нажимным диском 5 и шпонкой 7 пренебрегаем ввиду ее небольшого значения). Следовательно, на нажимной диск распорная сила УУ в данный период времени практически не действует, на основании чего запишем:

$$T_{\min} = zF_{n1}R_{cp}f_{\min}, \quad (1)$$

где  $z$  – число пар трения 3–4;  $F_{n1}$  – сила натяжения пружины 8;  $R_{cp}$  – средний радиус поверхностей трения дисков 3 и 4;  $f_{\min}$  – минимальный коэффициент трения.

Значение вращающего момента  $T_{\min}$  равно настроечному вращающему моменту АФМ.

В рассматриваемый период времени значение осевого зазора между заплечиком втулки 6 и торцом нажимного диска 5 минимальное и может составлять 0,1...0,2 мм. При выполнении неравенства  $f_i > f_{\min}$  ( $f_i$  – текущее значение коэффициента трения) и наступлении перегрузки в приводе машины увеличивается распорная сила. В этот период времени вращающий момент АФМ равен

$$T_i = zR_{cp}f_i(F_{n1} + F_{n2} - F_{pi}), \quad (2)$$

где  $F_{n2}$  – сила натяжения пружины 10;  $F_{pi}$  – текущая распорная сила.

Значение текущей распорной силы определяется по следующей формуле:

$$F_{pi} = \frac{T_i}{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол скоса гнезда под тело качения 11 (см. рис. 1, б);  $r$  – радиус окружности, на которой расположены тела качения 11 (см. рис. 1, а).

Подставляя формулу (3) в равенство (2) и решая составленное уравнение относительно неизвестного члена  $T_i$ , получаем:

$$T_i = zR_{cp}f_i \frac{F_{n1} + F_{n2}}{1 + zCf_i}. \quad (4)$$

Функция (4) – возрастающая по аргументу  $f_i$ , однако действие распорной силы при значениях коэффициента трения  $f_i > f_{\min}$  требует проверки выполнения условия  $T_{\min} \leq T_i$ , поскольку при значениях коэффициента трения  $f_i \approx f_{\min}$  возможно появление так называемого «провала» нагрузочной характеристики АФМ. При «провале» не выполняется указанное условие, что отрицательно сказывается на точности срабатывания АФМ.

Используя правые части соотношений (1) и (4), получаем:

$$C \leq \frac{n}{zf_{\min}}, \quad (5)$$

где  $n$  – коэффициент:  $n = F_{n2} / F_{n1}$ .

Соотношение (5) получено при помощи следующего приема. Функция (4) принимает минимальные значения при значениях коэффициента трения  $f_i \approx f_{\min}$ , поэтому в ней условно принят параметр  $f_{\min}$  вместо параметра  $f_i$ .

Значение коэффициента точности АФМ, с учетом соотношений (1) и (4) (при условии замены в последнем соотношении параметра  $f_i$  параметром  $f_{\max}$  – максимальным коэффициентом трения), вычисляется по следующей формуле:

$$K_T = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{m(1+n)}{1+mn}, \quad (6)$$

где  $m$  – коэффициент, отражающий относительную ширину интервала изменения значений коэффициента трения:  $m = f_{\max} / f_{\min}$ .

Анализ формулы (6) показывает, что значение коэффициента точности  $K_T$  уменьшается при увеличении коэффициента  $n$  (первая производная функции (6) по аргументу  $n$  отрицательная). С учетом соотношения (5) это означает, что точность срабатывания АФМ повышается при увеличении КУ  $C$ .

Поскольку значение настроечного (номинального) вращающего момента АФМ не зависит от значения КУ (см. формулу (1)), значение  $C$  может быть повышено с целью увеличения точности срабатывания муфты [7, 8].

Необходимо отметить, что формула (6), с учетом соотношения (5), может быть приведена к виду, идентичному формуле для определения коэффициента точности  $K_T$  муфты-аналога [9, 10]. Это означает, что при равных друг другу значениях КУ  $C$  сравниваемые муфты обладают одинаковой точностью срабатывания. Однако стремление к повышению точности срабатывания за счет увеличения КУ  $C$  приводит к резкому снижению значения вращающего момента  $T_H$  и требует увеличения силы натяжения пружины, замыкающей пары трения фрикционной группы.

Увеличение силы натяжения пружины ограничивается допустимым значением контактного давления на поверхностях трения [11]. На основании этого заметим, что при одинаковой силе замыкания пар трения фрикционной группы исследуемая АФМ обладает большей номинальной нагрузочной способностью при равной точности срабатывания, а при одинаковой номинальной нагрузочной способности имеет меньшую силу замыкания пар трения фрикционной группы при более высокой точности срабатывания.

### *Повышение точности срабатывания АФМ*

Осевое перемещение втулки 6 в процессе передачи нагрузки позволяет реализовать в муфте переменное значение КУ. Для этого боковые стенки гнезд под тела качения 11 профилированы двумя пересекающимися плоскостями, образующими с осью тела качения углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (см. рис. 1, в). В этом случае принцип действия УУ заключается в том, что при передаче вращающего момента, равного  $T_{\min}$ , и близких к нему по величине вращающих моментов тела качения 11 контактируют и участком боковой стенки гнезда, расположенным под углом  $\alpha_1$ , а в остальных случаях – с участком, расположенным под углом  $\alpha_2$ .

Реализация изложенного принципа действия УУ основана на том, что при значениях коэффициента трения, принадлежащих интервалу  $f_{\min} \dots f_k$  ( $f_k$  – значение коэффициента трения, при котором тела качения 11 начинают контактировать с участком боковой стенки гнезда, расположенным под углом  $\alpha_2$ , а заплечик втулки 6 – с нажимным диском 5), распорная сила замыкается только на втулке 6, затем, благодаря заплечу, она начинает действовать на нажимной диск 5.

При значениях коэффициента трения  $f_i > f_k$  вращающий момент АФМ определяется по формуле (2), что, с учетом соотношения (3), приводит к следующему выражению:

$$T_i = zR_{cp}f_i \frac{F_{nl} + F_{nl}}{1 + zC_1f_i}, \quad (7)$$

где  $C_1$  – коэффициент усиления УУ для участка боковой стенки гнезда с углом наклона  $\alpha_2$ :

$$C_1 = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg}\alpha_2.$$

Очевидно, что  $C_1 > C$ , поскольку  $\alpha_2 > \alpha_1$ . Для повышения точности срабатывания АФМ целесообразно, чтобы после начала действия распорной силы на нажимной диск 5 значение вращающего момента стало меньше, чем при значении коэффициента трения  $f_k$ . Кроме того, значение вращающего момента  $T_1$  не должно быть меньше, чем вращающий момент  $T_{\min}$ , а при значении коэффициента трения  $f_{\max}$  – не больше (вращающий момент  $T_{\max}$ ), чем значение вращающего момента при значении коэффициента трения  $f_k$ .

Соответствующая этому нагрузочная характеристика АФМ схематично показана на рис. 2.

С учетом соотношения (7) данные условия имеют соответственно следующий вид:

$$1 > \frac{n+1}{1 + zC_1f_k}, \quad (8)$$

$$f_{\min} \leq f_k \frac{n+1}{1 + zC_1f_k}, \quad (9)$$

$$f_k \geq f_{\max} \frac{n+1}{1 + zC_1f_{\max}}. \quad (10)$$

Запишем соотношения (8) и (9) в следующем виде:

$$f_k > \frac{n}{zC_1}, \quad (11)$$

$$f_k \geq \frac{f_{\min}}{(n+1) - zC_1f_{\min}}. \quad (12)$$

Сравнение формул (10) и (11) показывает, что правая часть формулы (10) больше правой части формулы (11) в том случае, если выполняется неравенство

$$n < zC_1f_{\max}. \quad (13)$$

Далее исследование будет основано на предположении о безусловном выполнении неравенства (13). При форме нагрузочной характеристики АФМ, показанной на рис. 2, значение коэффициента трения  $f_k$  определяет точность срабатывания муфты, поэтому целесообразно принять равными друг другу значения  $f_k$ , вычисляемые по соотношениям (10) и (12) в форме равенства.

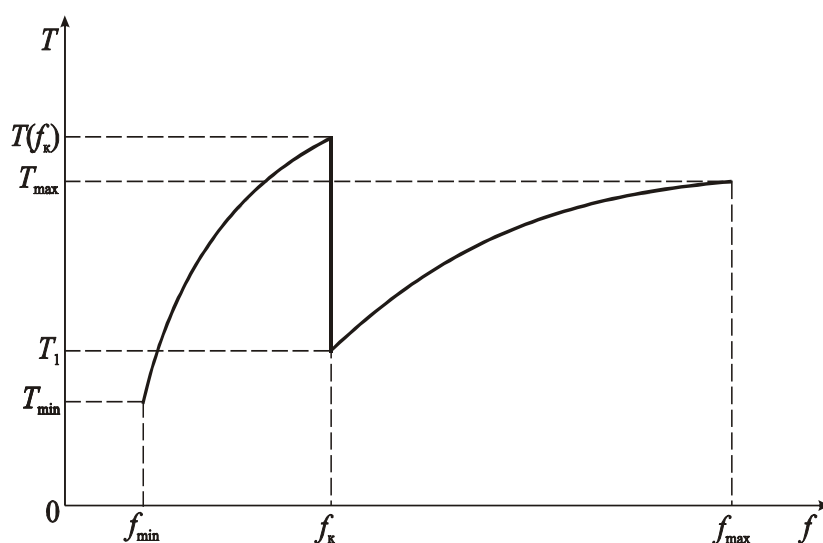


Рисунок 2. Схема нагрузочной характеристики АФМ.

На основании вышеизложенного, находим

$$C_1 = \frac{(n+1)^2 m - 1}{(n+2) z f_{\max}} \cdot (14)$$

Графики зависимостей  $C(n)$  и  $C_1(n)$  отражены на рис. 3 соответственно прямой 1 и кривой 2. Графики показывают, что  $C_1 > C$  при всех значениях коэффициента  $n$  в пределах интервала, отложенного на оси абсцисс рисунка.

С учетом формулы (14) значение коэффициента трения  $f_k$ , в

соответствии с равенством (10), составляет:

$$f_k = \frac{(n+2) f_{\max}}{(n+1)m + 1} \cdot (15)$$

Значение коэффициента точности АФМ, с учетом формулы (15), вычисляется по следующему выражению:

$$K_T = \frac{T(f_k)}{T_{\min}} = \frac{(n+2)m}{(n+1)m + 1} \cdot (16)$$

В выражении (16) параметр  $T(f_k)$  – вращающий момент АФМ при значении коэффициента трения, равном  $f_k$ . Сопоставление значений коэффициента точности по формуле (6) и выражению (16) в предположении, что  $K_T > K'_T$  приводит к выполняемому неравенству  $m > 1$ . Это подтверждает, что при одинаковых значениях параметров (кроме КУ) второй вариант АФМ обеспечивает более высокую точность срабатывания.

При увеличении коэффициента  $n$  уменьшаются значения коэффициента трения  $f_k$  и коэффициента точности  $K_T$ .

Значение КУ  $C$  в данном случае можно определить, используя уравнение

$$F_{p.k} = F_{п2} + cx, \quad (17)$$

где  $F_{p.k}$  – распорная сила УУ, соответствующая коэффициенту трения  $f_k$ ;  $c$  – коэффициент осевой жесткости пружины 10;  $x$  – значение осевого перемещения втулки 6 от левого исходного положения до поло-

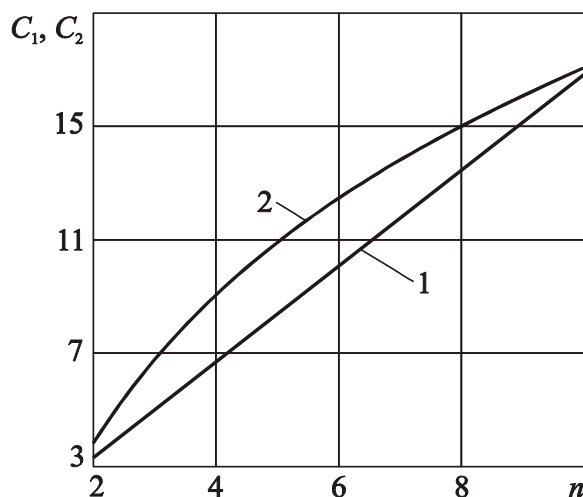


Рисунок 3. Зависимости коэффициентов усиления  $C$  и  $C_1$  от коэффициента  $n$

жения, соответствующего переходу тел качения 11 на участок боковой стенки гнезда с углом наклона  $\alpha_2$ .

Значение распорной силы УУ вычисляется, по аналогии с формулой (3), по соотношению

$$F_{p.k} = \frac{T(f_k)}{r} \operatorname{tg} \alpha_1 = zF_{п1} C f_k. \quad (18)$$

Подставляя соотношение (18) в равенство (17), получим с учетом выражения (15)

$$C = \frac{(n+1)m+1}{(n+2)z f_{\max}} \left( n + \frac{cx}{F_{п1}} \right). \quad (19)$$

При настройке предохранительных муфт значение силы натяжения пружины контролируют, чаще всего, по ее осевой осадке, поэтому выражение (19) запишем в следующем виде:

$$C = \frac{[(n+1)m+1]n}{(n+2)z f_{\max}} \left( 1 + \frac{x}{x_1} \right), \quad (20)$$

где  $x_1$  – значение осевой осадки пружины 10, соответствующее силе натяжения пружины  $F_{п2}$ .

При регулировании сил натяжения пружин 8 и 10 с помощью одного регулировочного элемента отношение значений коэффициентов осевой жесткости пружин должно равняться значению коэффициента  $n$ . При этом условия сохраняется наибольшая точность срабатывания АФМ.

Действительно, если не выполняется указанное отношение значений коэффициентов осевой жесткости пружин, то при  $c_1 > c$  (где  $c_1$  – коэффициент осевой жесткости пружины 8) дополнительное натяжение пружин приведет к большему увеличению силы натяжения пружины 8 по сравнению с силой натяжения пружины 10. Поэтому сила  $F_{п2}$  не будет уравновешивать распорную силу при значениях коэффициента трения  $f_i = f_{\min} \dots f_k$ , и муфта начнет работать в адаптивном режиме при значении коэффициента трения  $f_{\min}$  или  $f_i < f_k$ .

В первом случае уменьшается значение вращающего момента  $T_{\min}$ , во втором случае – вращающий момент в начальный период работы АФМ в адаптивном режиме становится меньше, чем вращающий момент  $T_{\min}$ . Это приводит к снижению точности срабатывания муфты.

Уменьшение сил натяжения пружин, наоборот, приводит к нарушению баланса силы  $F_{п2}$  и распорной силы ( $F_{п2} > F_p$ ) и, соответственно, к увеличению коэффициента трения  $f_k$ , т. е. к снижению точности срабатывания АФМ.

При  $c_1 < c$  увеличение сил натяжения пружин приводит к нарушению баланса силы  $F_{п2}$  и распорной силы ( $F_{п2} > F_p$ ), а уменьшение сил натяжения пружин – к началу действия обратной связи при значении коэффициента трения  $f_{\min}$ . В обоих случаях будет снижена точность срабатывания АФМ.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании модернизированной АФМ первого поколения для определения значений параметров, обеспечивающих более высокую номинальную нагрузочную способность и точность срабатывания муфты.

### 3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Отключение действия обратной связи при минимальном значении коэффициента трения позволило повысить номинальный (настроечный) вращающий момент и точность срабатывания модернизированного варианта АФМ первого поколения.

2. Модернизация УУ обратной связи за счет обеспечения дифференцированного значения КУ в соответствующих интервалах значений коэффициента трения позволило дополнительно повысить точность срабатывания АФМ.

3. Наибольшая точность срабатывания модернизированной АФМ поддерживается с помощью определенного значения отношения первоначальных сил натяжения замыкающих пружин.

4. Для сохранения наибольшей точности срабатывания модернизированной АФМ при ее настройке отношение значений коэффициентов осевой жесткости пружин, замыкающих УУ и фрикционную группу, должно быть равно величине отношения первоначальных сил натяжения пружин.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарёв, М. П. Вопросы теории адаптивного фрикционного контакта твердых тел / М.П. Шишкарёв // Изв. вузов. Машиностроение. – 1994. – № 4–6. – С. 43–47.

2. Шишкарёв, М. П. Теоретические основы стабилизации выходного параметра адаптивного фрикционного контакта твердых тел / М.П. Шишкарёв // Изв. вузов. Машиностроение. – 2001. – № 2–3. – С. 17–23.

3. Шишкарёв, М. П. Функциональные связи между характеристиками предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 8–10.

4. Шишкарёв, М. П. Оптимальный способ настройки предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 3. – С. 16–19.

5. Шишкарёв, М. П. Анализ способов настройки предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестник машиностроения. – 2009. – № 8. – С. 29–32.

6. Шишкарёв, М. П. Влияние способа настройки адаптивной фрикционной муфты (базовый вариант) на ее предельную нагрузку / М.П. Шишкарёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 12. – С. 552–557.

7. Шишкарёв, М. П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 13–15.

8. Шишкарёв, М. П. Уровень перегрузок в адаптивных фрикционных муфтах с переменным коэффициентом усиления / М.П. Шишкарёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 2. – С. 70–75.

9. Шишкарёв, М. П. Синтез и анализ адаптивной фрикционной муфты с отрицательно-нулевой обратной связью / М.П. Шишкарёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 11. – С. 499–505.

10. Шишкарёв, М.П. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения / М.П. Шишкарёв, Чан Ван Дык // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 9. – С. 42–45.

11. Шишкарёв, М. П. Оптимизация коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт первого поколения с дифференцированными парами трения / М. П. Шишкарёв // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 4. – С. 36–39.

Поступила в редколлегию 31.01.2021 г.



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Бахадиров Г. А., Цой Г. Н., Набиев А. М., Умаров А. А</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ДАВЛЕНИЯ ВАЛКОВОГО СТЕНДА.	3
<b>Бутенко В. И.</b> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ.....	9
<b>Витренко В.А., Сыровой Г.В., Перевозчиков В.А.</b> УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛОПЛАСТИКОВОГО БАЛЛОНА НА ОСНОВЕ НАНОАРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ.....	16
<b>Горобец И. А.</b> ВЫБОР 3D ФОРМЫ ЗУБЬЕВ РЕЙКИ КОЛЕСНО - РЕЕЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ..	22
<b>Грубка Р. М.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДА МЕЖДУ СИСТЕМАМИ КООРДИНАТ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС.....	29
<b>Гутаревич В. О., Скляров В. Н.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РОЛИКОВ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ.....	36
<b>Казарян С. Д., Закарян Н. Б., Арутюнян М. Г., Саргсян Ю. Л.</b> ПОРТАТИВНОЕ ПАССИВНО УРАВНОВЕШЕННОЕ АССИСТИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ИНДУСТРИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	42
<b>Кирсанов М.Н., Сунь Цзясюань</b> НИЖНЯЯ ГРАНИЦА ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСОЛИ ФЕРМЫ МАНИПУЛЯТОРА .....	47
<b>Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б.</b> СИНТЕЗ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАН НОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВА НИИ И ФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ КПП.....	53
<b>Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Володько А. С., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М., Углов В. В.</b> ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ М- КРОЛЕЙ И ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ.....	68

<b>Северов П. Б.</b> ИЗМЕНЕНИЕ КАСАТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЕ - ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ.....	<b>84</b>
<b>Сидоров В. А., Цокур В. П.</b> ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРОМЕТРИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ СТАНКОВ С ЧПУ .....	<b>91</b>
<b>Шишкарев М. П.</b> СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ .....	<b>100</b>

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Арутюнян М.Г.	42
Асташинский В.М.	68
Бахадиров Г. А.	3
Бутенко В. И.	9
Витренко В.А.	16
Володько А.С.	68
Горобец И.А.	22
Грубка Р.М.	29
Гутаревич В.О.	36
Девойно А.Г.	68
Закарян Н.Б.	42
Казарян С.Д.	42
Кирсанов М.Н.	47
Котляров Б.С.	53
Котляров В. Б.	53
Котляров С. Б.	53
Михайлов А.Н.	53
Набиев А. М.	3
Оковитый В. А.	68
Оковитый В.В.	68
Пантелеенко Ф. И.	68
Перевозчиков В.А.	16
Саргсян Ю.Л.	42
Северов П.Б.	84
Сидоров В.А.	91
Сидоров В.А.	68
Скляр В.Н.	36
Сунь Цзясюань	47
Сыровой Г.В.	16
Углов В.В.	68
Умаров А. А.	3
Цой Г. Н.	3
Цокур В.П.	91
Шишкарёв М. П.	100

**ПРАВИЛА**  
**представления материалов в международный сборник научных трудов**  
**Донецкого национального технического университета**  
**«ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» издается с 1994 года. В этом сборнике публикуются ученые и специалисты более чем из 30 стран мира.

Сборник научных трудов является специальным изданием, научно-технические статьи которого проходят **обязательное рецензирование**. Данный сборник включен в следующие программы:

1. В сборнике могут публиковаться научно-технические статьи и результаты диссертационных работ.
2. Сборник включен в **перечень ВАК ДНР** (приказ № 774 от 24.07.2017 г.).
3. Сборник имеет сайт <http://ptsm.donntu.org>, а также размещен на сайте кафедры «Технология машиностроения» ДонНТУ, г. Донецк: <http://tm.donntu.org>
4. Сборник включен **базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)** и размещен на сайте НЭБ (Научная электронная библиотека, г. Москва, Россия, <http://elibrary.ru>)
5. Данный сборник имеет **международную индексацию ISSN 2073-3216 (печатная версия) и ISSN 2518-7120 (сетевое издание)**

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

Содержание статей должно отражать новые достижения науки и техники в области машиностроения, их практическое значение, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны представляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, за несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность в статье данных полностью несут авторы статьи.

Присланные в редакционную коллегию статьи подвергаются обязательному рецензированию. Редакционная коллегия оставляет за собой право вносить в текст статьи изменения редакционного характера без согласования с авторами, а также не публиковать статьи, которые не отвечают нашим требованиям.

Языки представления рукописей: **русский, украинский и английский.**

**ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА**

Тематика представляемых статей должна основываться на проблемах машиностроения (механики) и представляться в рамках следующих направлений:

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий машиностроения. Интегрированные технологии. Сборка в машино- и приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения.

2. Механизация и автоматизация производственных процессов машиностроения. Прогрессивное оборудование машиностроительных производств.

3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления машиностроительным производством.

4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов в машиностроении.

5. Управление качеством продукции и технических систем машиностроения. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий.

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

7. Современные проблемы инженерии материалов. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии в машиностроении.

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

В рамках сборника можно представлять рекламу продукции, которая будет помещена после рукописей статей.

### **СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ**

Научно-технические статьи, представляемые в данный сборник должны иметь следующие элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями;

- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, выделение нерешенных раньше частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;

- формулирование цели и постановка задач работы;

- представление основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов, формулирование рекомендаций;

- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

### **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

Для принятия решения о включении материалов Вашей статьи в сборник необходимо выслать в адрес редакционной коллегии следующее:

- заявку и сведения об авторах статьи;
- материалы статьи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- все материалы отправляются по E-mail по адресам: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org) или [mntk21@mail.ru](mailto:mntk21@mail.ru) .

### **ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ**

1. Текст статьи выполняется объемом от 5 до 10 страниц (**обязательно полные страницы**), формат А4 (210x297 мм) с полями: верхнее и нижнее – 30 мм, а левое и правое - 25 мм. Страницы не нумеровать. Статьи оформить с применением редактора WinWord (не ниже версии 6,0) шрифтом Times New Roman, выполненным в соответствии с образцом оформления, межстрочный интервал - 1,0, шрифт – 12pt. Материалы представить в электронном виде.

2. Порядок оформления. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (сокращение по ГОСТ 7.11-2003 и 7.12-2003), полное название организаций и стран, тел./факс, E-mail, название статьи, аннотация на языке статьи, ключевые слова, основной текст, заключение

или выводы, список литературы, дополнительные аннотации на других языках с ключевыми словами, внизу первой страницы необходимо указать авторский знак - ©. **УДК** печатать прописными (жирными) буквами в верхнем правом углу не отступая от верхнего поля. На следующей строке слева жирными строчными буквами – **инициалы и фамилии** авторов с учеными степенями и званиями, на следующих строках – полное название организаций и стран (через запятую, слева). На следующей строке курсивом слева – тел./факс и электронный адрес одного из авторов. Через один интервал - название статьи, печатать прописными (жирными) буквами, без переносов, центрировать по ширине, максимумом три строки. Через один интервал - аннотации с ключевыми словами (слово аннотация не пишется) на двух языках шрифтом 10 pt, *курсивом*. Через один интервал – материалы статьи, шрифт 12 pt (язык изложения – по выбору авторов, межстрочный интервал 1,0). Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Между соответствующими разделами статьи необходимо делать интервал. (См. образец оформления материалов). Абзац текста – 1,25.

3. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в формате \*.bmp, \*.gif, \*.psx, \*.dwg, \*.jpg - размерами не менее 60x60 мм внедренными объектами (по ходу материалов). Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте. Позиции на рисунке должны располагаться по часовой стрелке. Под каждым рисунком указывается его номер и название, например: Рисунок 3. Схема устройства. Текст названия рисунка группируется с рисунком. Каждый рисунок должен иметь один интервал сверху и снизу.

4. Формулы и математические знаки должны быть понятны. Показатели, степени и индексы должны быть меньше основных знаков и выполняться в соответствии с редактором формул Microsoft Equation. Формулы номеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля), только в том случае, если на них в тексте имеются ссылки. Между крайними знаками формулы и текстом должен выполняться один интервал. Формулы выполняются курсивом.

**Стиль формул для Microsoft Equation:** Full - 12 pt, Subscript/Superscript - 10 pt, Sub-Subscript/Superscript - 8 pt, Symbol - 12 pt, Sub-Symbol - 10 pt.

5. Все таблицы должны иметь название и порядковый номер и располагаться после упоминания по тексту, например: Таблица 2. Классификация муфт. Каждая таблица должна иметь один интервал сверху и снизу.

6. **Список литературы** должен быть приведен в конце статьи в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 . Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

7. Файл со статьей необходимо назвать по фамилиям и инициалам авторов в соответствии с работой (например: Иванов И.И., Петренко П.П.)

8. Материалы статьи представляются в электронном виде.

9. Материалы, не отвечающие перечисленным требованиям и тематике данного сборника, а также поступившие в редакционную коллегию с опозданием, **опубликованы не будут**.

## **СТАТЬИ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ:**

**1. УДК** (Например, **УДК 621.01**) (располагать вверху справа, шрифт жирный, 12 pt).

**2. Инициалы и фамилии авторов** (слева, шрифт жирный, 12 pt), ученая степень и звание, затем на следующей строке - полное название *организаций и стран* (слева, 12 pt), на следующей строке – *Тел./факс и электронный адрес* (слева, курсив, 12 pt).

**3. Название статьи** (слева, шрифт жирный, 12 pt, максимум три строки).

**4. Пустые строки, межстрочный интервал и размеры шрифта статьи.** Пустые строки выполняются между названием статьи - вверху и внизу, перед соответствующими разделами работы (один пробел) и списком литературы, а также между дополнительной аннотацией вверху и внизу. Межстрочный интервал – **1,0**. Размер шрифта статьи - **12 pt**, размер шрифта аннотаций и авторского знака - **10 pt**.

**5. Аннотации (Abstract)** (слово аннотация не пишется), (курсив, 10 pt). Первая аннотация пишется на языке статьи, а вторая на английском, если статья на английском языке, первая аннотация пишется на английском языке, а вторая – на русском языке.

В аннотации приводятся краткие сведения о всей статье в целом на языке статьи. Объем аннотаций приблизительно до 10 строк, аннотация выполняется курсивом.

**6. Ключевые слова (Keywords)** (приводится 5-6 ключевых слов статьи), выполняются курсивом на следующей строке от аннотации. (курсив, 10 pt)

**7. Введение (Introduction).** (12 pt)

Во введении приводится аналитический (исторический) обзор современного состояния вопроса исследования, выполняется постановка проблемы исследования или показывается актуальность данного исследования (работы). Здесь нужно обязательно указать результаты последних исследований других авторов. А также сформулировать цель и задачи исследований.

**8. Основное содержание и результаты работы (The main contents and outcomes of activity).** (Авторы могут дополнять работу другими разделами) (12 pt).

В данном разделе излагаются и подробно разъясняются полученные авторами теоретические положения и практические результаты. Приводятся принятые гипотезы и используемые допущения, разъясняются малоизвестные термины, аббревиатуры и условные обозначения. Для теоретических положений приводятся их доказательства и необходимые математические преобразования. Для экспериментальных исследований кратко описываются методики их проведения, способы обработки данных и результаты проверок адекватности и достоверности результатов.

**9. Авторский знак.** Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Например: © Иванов И.И., Петренко П.П.; 2021 (10 pt).

**10. Заключение (Conclusion)** (12 pt)

В заключении излагаются выводы по полученным авторами результатам, описываются примеры их практического применения, предлагаются рекомендации относительно их использования, приводятся выводы, а также указываются перспективы дальнейших исследований по данной проблематике.

**11. Литература (References).** (12 pt)

Список литературных источников должен быть составлен в порядке ссылок на них. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5-6, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

**АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра «Технология машиностроения», Редакционная коллегия сборника.

Тел./факс: +38 062 301-08-40.

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org) или [mntk21@mail.ru](mailto:mntk21@mail.ru)

<http://ptsm.donntu.ru>

- **Публикация статей в международном сборнике научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - выполняется бесплатно**

*Образец оформления материалов*  
УДК 621.85.05-034(12 pt)

**И. И. Иванов**, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)  
Донецкий национальный технический университет, ДНР (12 pt)  
Брянский государственный технический университет, Россия (12 pt)  
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org) (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

**ОСНОВЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ**  
(слева, 12 PT, ЖИРНЫМ, ЗАГЛАВИЕ МАКСИМУМ ТРИ СТРОКИ)

(пустая строка - 12 pt)

*В статье приведены данные по структурному синтезу сборочных .....  
..... уравнений описывающих процесс сборки изделий. (курсив, 10 pt, до 10 строк).*

*Ключевые слова: структура технологии, синтез, процесс, технология, сборка. (курсив, 10 pt, 5 ...6 слов)*

(пустая строка - 10 pt)

**I. I. Ivanov, P. P. Petrenko** (10 pt)  
(10 pt)

**BASES OF THE STRUCTURED SYNTHESSES OF THE ASSEMBLY SYSTEMS** (10 pt)

*The efficient design of assembly machinery is vitally important .....  
.....as noun description of functions of presented in the paper.*

*Keywords: structured syntheses, process of the assembly, technological system. (курсив, 10 pt)*

(пустая строка - 12 pt)

**1. Введение** (12 pt)

Сборочные системы являются сложными иерархическими системами. Одним из условий [1] повышения производительности ... сборочных технологических систем (рис. 5). Технологические системы .....

(пустая строка - 12 pt)

**2. Основное содержание и результаты работы** (12 pt)

Для сборки изделий широко применяются технологические системы .....  
информационные и другие потоки могут быть описаны следующим образом:

$$k_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (1)$$

где  $k_m$  - элемент множества;



..... позволили разработать общие алгоритмы функционирования системы.

(пустая строка - 12 pt)

### **3. Общий алгоритм и рекомендации** (12 pt)

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм .....

..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

### **4. Цифровые модели** (12 pt)

В работе разработаны цифровые структурно-логические модели структуры сборочных систем, выполненные с применением основных положений алгебры структур .....

(пустая строка - 12 pt)

### **5. Заключение** (12 pt)

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов .....

..... отличительной особенностью данной методики.

2. Установить закономерности .....

..... позволили произвести процесс итерации.

3. Разработать рекомендации .....

© Иванов И.И., Петренко П.П.; 2016 (приводится внизу первой страницы статьи, 10 pt)

..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

### **ЛИТЕРАТУРА:**

(центрировать, 12 pt, не менее 5 ... 6 библиографических источников)

1. Ким, И. П. Исследование эффективности роторных машин / И. П. Ким. – К: КПИ, 1985. – 123 с. ISBN 966-7907-22-8.

2. Устюгов, А. В. Надежность технологических машин / А. В. Устюгов. – Донецк: ДонНТУ, 1998. – 425 с. ISBN 966-7907-23-6.

3. Савельев, А. А. Сборка машин / А. А. Савельев – М.: Наука, 2009. - 342 с. ISBN 966-7907-26-9.

4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.

5. Базров, Б. М. Модульные технологии / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2000. – 368 с. ISBN 5-217-03061-5.

6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин // Научно-технический журнал. – М.: Машиностроение. – 2014. - № 9. – С. 11-17.

7. Любшин, А. Н. Особенности полировки лопаток с коррозионными разрушениями покрытий / А. Н. Любшин, А. Н. Шейко, Б. Л. Недашковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1 (25). – С. 207-212

(пустая строка - 12 pt)

Поступила в редколлегию \_\_\_\_\_ (дата поступления статьи, 10 pt)

**НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ**

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И  
СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Выпуск 2 (73)' 2021**

Главный редактор  
*д-р техн. наук, проф. А.Н. Михайлов*  
E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org)  
*Технический редактор Л. Б. Ступакова*

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУВПО «ДОННТУ»,  
+38 (062) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел. +38 (071) 306-08-79,  
+38 (062) 301-08-05.

E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org)

Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики.