

Вып. 2 (85)' 2024    **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



**ДОНЕЦКИЙ**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ**

**ТЕХНИЧЕСКИЙ**

**УНИВЕРСИТЕТ**

ISSN 2073-3216  
(E) ISSN 2518-7120

# **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Международный  
сборник научных трудов**

**Выпуск 2 (85)' 2024**



**ДОНЕЦК - 2024**

ISSN 2073-3216  
(E) ISSN 2518-7120

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Международный сборник научных трудов

Основан в декабре 1994 года

Выходит 4 раза в год

**Выпуск 2 (85)' 2024**

**Донецк – 2024**

## **УДК 621.01(06)**

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 1 от 20 февраля 2024 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 – ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»** (Свидетельство о государственной регистрации юридического лица от 07.04.2016 г. № 029192 серия АА03).

Издается при содействии **Донецкого регионального отделения «Союз машиностроителей России»**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:** Михайлов А.Н. (гл. редактор) (ДНР), Горобец И.А. (зам. гл. редактора) (ДНР), Лахин А.М. (секретарь) (ДНР), Баласанян Б.С. (Армения), Бахадиров Г.А. (Узбекистан), Брешев В.Е. (ЛНР), Бутенко В.И. (РФ), Витренко В.А. (ЛНР), Мазуру С. (Молдова), Овчинников Е.В. (Беларусь), Пантеленко Ф.И. (Беларусь), Поветкин В.В. (Казахстан), Суслов А.Г.(РФ), Тока А. (Молдова), Хандожко А.В. (РФ)

Адрес редакции: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58,  
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, кафедра «Технология машиностроения». **Тел.:** +7-856- 301-08-40. **E-mail:** [tm@fimm.donntu.ru](mailto:tm@fimm.donntu.ru)

**Сайт:** <http://ptsm.donntu.ru>

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, 2024  
© ФГБОУ ВО «ДОННТУ», 2024

**Н. В. Азарова**, доц., канд. техн. наук, **А. Г. Мамолат**, магистр,  
**С. А. Поезд**, доц., канд. техн. наук, **В. П. Цокур**, канд. техн. наук, доц.,  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Россия  
Тел./Факс: +38(062) 3010807; E-mail: mc@meth.dgtu.donetsk.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПРАВКИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

*Определен способ восстановления режущих свойств рабочей поверхности алмазного круга путем электроэрозионной правки медным электродом на рабочей скорости круга с применением в качестве охлаждающей жидкости 0,3% водного раствора кальцинированной соды. При использовании источника технологического тока ИТТ-35 за 10 мин снимается алмазоносный слой высотой 0,04мм, обеспечивая выступание зерен и удаление продуктов шлифования.*

**Ключевые слова:** медный электрод, алмазный круг, связка М2-01, электроэрозия.

**N. V. Azarova, A. G. Mamolat, S. A. Poezd, V. P. Tsokur**

### INVESTIGATION OF WAYS TO EDIT DIAMOND CIRCLES ON A METAL BUNDLE

*A method for restoring the cutting properties of the working surface of a diamond circle by electroerosive edging with a copper electrode at the working speed of the circle with the use of 0.3% aqueous soda ash solution as a coolant is determined. When using the ITT-35 process current source, a 0.04mm diamond-bearing layer is removed in 10 minutes, ensuring the protrusion of grains and the removal of grinding products.*

**Keywords:** grinding wheel, diamond grains, bind.

#### 1. Введение

Процесс шлифования предусматривает, что абразивный инструмент будет сам обновлять свою рабочую поверхность, но процесс обновления не является непрерывным и наступает такое состояние рабочей поверхности круга (РПК), когда обработанная поверхность не соответствует требованиям чертежу детали, и тогда необходимо принудительно восстанавливать РПК. Шлифовать детали из конструкционной и режущей керамики, твердого сплава, титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов можно только алмазными зернами высокой прочности, закрепления которых в круге осуществляется металлическими связками, что позволяет увеличить время работы каждого зерна и обеспечит повышение производительности и снижение стоимости обработки [1, 2, 3].

Многочисленными исследованиями установлено, что на алмазных зернах видны площадки износа, сколы части зерна, застрявшие и приваренные стружки (рис. 1), а на поверхности металлической связки канавки от контакта с обрабатываемым материалом, напыление мелкодисперсных частиц продуктов обработки на зерна и связку [3, 4, 5]. Для обеспечения процесса срезания стружек необходимо, чтобы в зоне контакта находилось нужное количество зерен, а их вершины выступали над связкой на заданную величину в зависимости от зернистости алмазных зерен. Хотя время перемещения РПК по дуге контакта с обрабатываемым материалом для круга диаметром 250 мм составляет  $5 \times 10^{-5}$ с в зоне резания возникают высокие температуры, протекают различные физико-химические процессы, которые приводят к изменениям состояния РПК и обработанной поверхности. Для удаления застрявших стружек на зернах, очистки межзеренного пространства, обеспечение выступания зерен над связкой применяются абразивный, электрохимический электроэрозионный, комбинированный способы восстановления необходимых параметров РПК [3, 4, 5].

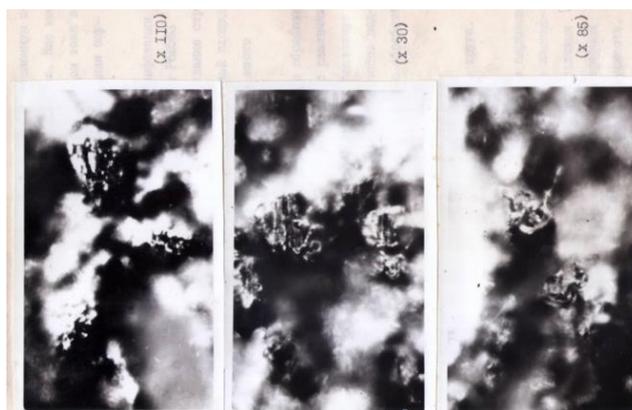


Рисунок 1. Стружки на алмазных зернах [3]

Наиболее перспективными являются способы непрерывной или периодической правки алмазных кругов при подачи технологического тока в зону резания или в зону, расположенную под углом  $90^\circ$  [3] или  $180^\circ$  [4], обеспечивающий обновление РПК непосредственно на станке на рабочей скорости круга с использованием применяемой смазочно-охлаждающей жидкости. при минимальном удалении алмазоносного слоя.

Целью исследований – найти метод правки алмазных кругов, обеспечивающий обновление РПК непосредственно на станке с использованием применяемой смазочно-охлаждающей жидкости при минимальном удалении алмазоносного слоя.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Исследования различных способов восстановления РПК проводили на модернизированных плоскошлифовальных станках моделей 3Г71 и 3Д711Ф1 (смотри рис. 2).

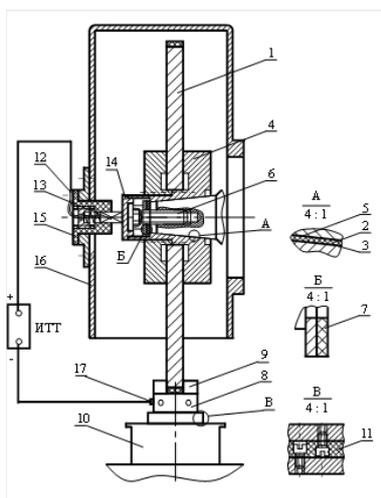


Рисунок 2. Схема модернизация оборудования:

- 1 – алмазный круг; 2 – электроизоляционная прокладка; 3 – пленка; 4 – фланцы; 5 – пленка; 6 – винт крепления фланцев к шпинделю; 7 – шайба - изолятор; 8 – корпус для закрепления электрода; 9 – электрод; 10 – стол; 11 – текстолит; 12 – втулка-изолятор; 13 – щетка; 14 – токосъемник; 15 – корпус для размещения щетки; 16 – кожух; 17 – клемма провода.

Модернизация оборудования для электроэрозионной правки алмазного круга с помощью устройств в зоне резания и расположенной под углом  $90^\circ$  от зоны резания заключалась в изолировании устройств от станины. Для определения объема алмазного слоя, удаленного при правке, или износе круга при шлифовании спроектировано устройство измерения координат РПК в 6 радиальных и 5 осевых сечениях с помощью индикатора с ценой деления  $0,001\text{ мм}$ . Радиальное расположение круга определял по рискам на поверхности круга и лупы Бринелля, а осевое с помощью микрометра (рис. 3).

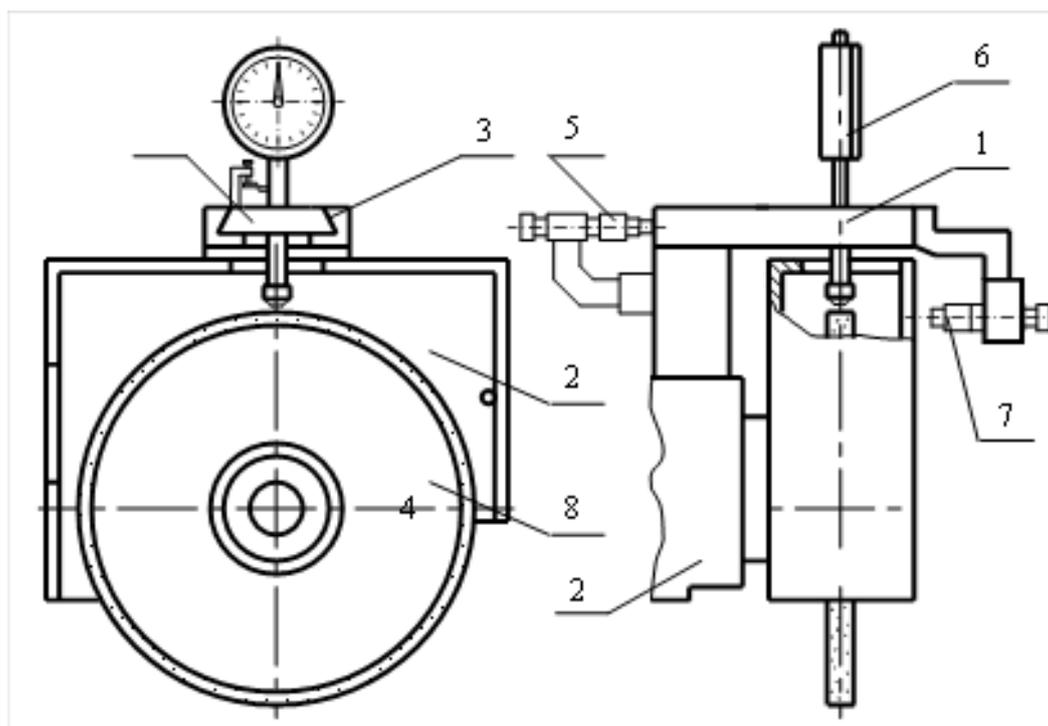


Рисунок 3. Устройство для измерения координат круга:

- 1 – Корпус; 2 – шпиндельная бабка; 3 – ласточкин хвост; 4 – плита подвижная; 5 – микрометр; 6 – индикатор; 7 – лупа Бринелля; 8 – алмазный круг.

Исследования проводились кругами 1A1 250×76×15×5 AC6 4-M2-01 разной зернистости, контроль идентичности РПК перед экспериментом после электроэрозионной правки путем записи сил резания. В качестве источника технологического тока использовались широкодиапазонный генератор ШГИ125-100М и ИТТ-35. Исследования показали, что целесообразно использовать более дешевый и простой в эксплуатации ИТТ-35. Эксперименты проводили при подачи технологического тока в зону резания или в зону, расположенную под углом  $90^\circ$  [3]. Подача технологического тока в зону резания в процессе шлифования приводит к большому расходу алмазного слоя и сложности управлением процессом обновления РПК [3]. Для гарантии, что поверхность круга после правки имеет идентичные параметры РПК, кроме визуального контроля определяли значение сил резания и при необходимости дополнительно правили. Для определения материала правящего электрода исследовали 4 материалах (табл. 1): медь М1 (высокие электрическое сопротивление, теплопроводность, удельная проводимость и сливная стружка с большим коэффициентом усадки), титановый сплав ВТ14 (очень высокое удельное электрическое сопротивление, низкая удельная проводимость и сливная

стружку с отрицательным коэффициентом усадки), сталь 45 (для сравнения), твердый сплав Т15К10, обладающий большой твердостью и способный инициировать механическое удаление выступающих из связки алмазных зерен.

Таблица 1. Теплофизические и электрические характеристики материалов

№, п/п	Характеристики материалов	Сталь 45	Медь М1	Титан	Твердый сплав Т15К6
1	Теплопроводность, Вт/м×К	47	382...390	21...15	50,2
2	Удельное электрическое сопротивление, мКОм м	0,1 ...0,13	38...34	1100	0,053...0,055
3	Удельная проводимость, мСм/м	9,7...7,3	58...55,5	1,72	19...18
4	Температурный коэффициент сопротивления, $1 \times 10^{-40} \text{C}^{-1}$	57...62	41...43	35	41...50
5	Температурный коэффициент линейного расширения, $1 \times 10^{-6}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	11	1,7	8,9	4,3

Эксперимент показал, что производительность правки зависит от длины электрода, подводимого напряжения от источника технологического тока и подачи на врезание. В зоне правки происходит очистка зерен от налипшей и вдавленной стружки, удаление связки и слабо закрепленных алмазных зерен. Между поверхностями круга и электрода могут проходить различные импульсы: рабочие, холостые, короткого замыкания, частичного короткого замыкания (рис. 4). Производительность правки увеличивается при уменьшении количества холостых импульсов и импульсов короткого замыкания, которые находятся в зависимости от подачи на врезание (рис. 5).

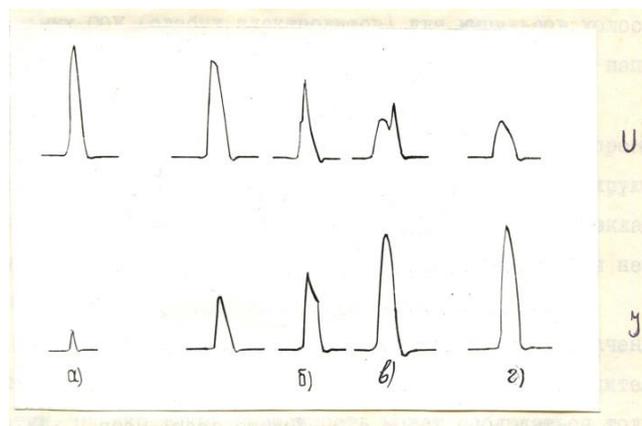


Рисунок 4. Формы импульсов  
а) холостые; б) рабочие; в) короткого замыкания; г) частично короткого замыкания

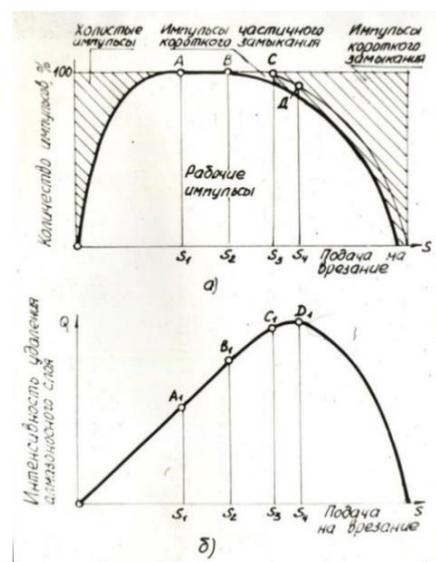


Рисунок 5. Зависимость интенсивность удаления алмазного слоя от формы импульсов и подачи: а – количество импульсов, б – интенсивность удаления алмазного слоя

Для определения длины электрода, которая обеспечивала бы максимальную производительность правки, проводили эксперименты при длине электрода 10,20,30,40,50мм. Эксперименты показали, что количество срезанных стружек на дуге контакта существенно влияет на производительность правки, увеличивая количество рабочих импульсов. Увеличить число рабочих импульсов и тем самым повысить производительность правки можно путем повышения напряжения технологического тока (рис. 6).

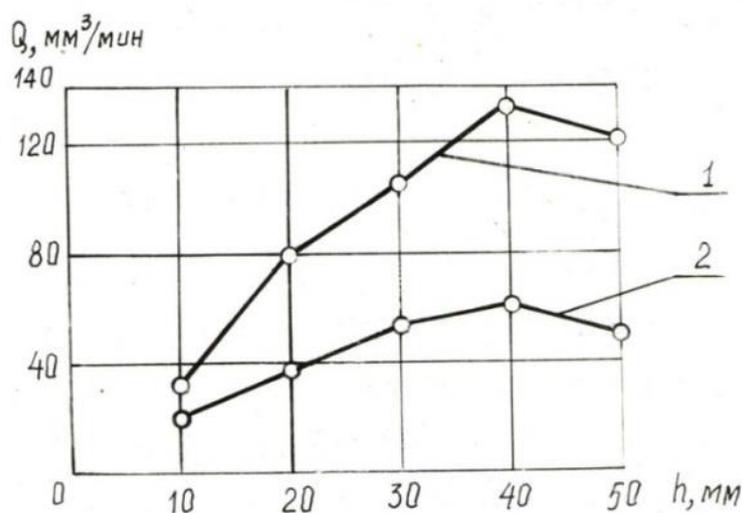


Рисунок 6. Производительность правки на медном электроде в зависимости от его длины и подаваемого напряжения: 1 – 60 вольт, 2 – 50 вольт.

Правку осуществляли в рабочей зоне на рабочей скорости круга бруском из меди М1 длиной 30 мм с ручной поперечной подачей, а и вертикальную подачу изменяли в диапазоне 0,003...0,007 мм/ход, для обеспечения средней величины сила тока 5...8 А при напряжении холостого хода 50 В.

### 3. Заключение

Экспериментально установлено, чтобы очистить РПК от следов предыдущей обработки на алмазном круге зернистостью 160/125 необходимо удалить алмазный слой высотой 0,04мм, что обеспечивается подводом технологического тока 50В и вертикальной подаче до 0,007мм/ход.

Электрод из меди обеспечивает получение максимальной производительности правки, так как обеспечивает получения сливной стружки и ввиду высокой теплопроводности и минимального удельного электрического сопротивления.

Площадь контакта РПК с электродом должна быть по всей высоте круга и 30мм по периферии, что обеспечивает многократное замыкание межэлектродного промежутка срезанными стружками.

Для удаления алмазоносного слоя на 0,04мм, что обеспечивает очистку РПК от следов предыдущей обработки и обеспечения выступания зерен над связкой необходимо 10 мин.

**ЛИТЕРАТУРА:**

- 1 Механика и производительность алмазного шлифования с учетом износа зерен круга / Ф. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко, В. И. Полянский, В. В. Ивкин // Резание и инструменты в технологических системах. – Харьков, 2018. – Выпуск 88. – С. 142-157.
2. Emerging Trends in Grinding of Materials. K. Philip Varghese, Ph. D. Group Leader, Advanced Application Engineering. 12–17 сентября 2016. McCormick Place. Чикаго, Иллинойс. [http://www.mapyourshow.com/MYS\\_Shared/imts16/handouts/KPhilipVargheseIMT...](http://www.mapyourshow.com/MYS_Shared/imts16/handouts/KPhilipVargheseIMT...)<http://www.nortonabrasives.com/en-us/resources/expertise/grinding-gamma-...>
3. Цокур, В. П. Повышение производительности и качества обработки труднообрабатываемых материалов при алмазном шлифовании с электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность круга: Дис. канд. техн. наук: 05.03.01. – Донецк, 1995. – 257 с.
4. Голубев, И. В. Круглое наружное шлифование со стабилизацией режущей способности токопроводящего инструмента электрическими разрядами: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01. – М., 1985. – 16 с.
5. Архипов, П. В. О проблемах засаливания при электро-алмазном шлифовании/ П. В. Архипов, А. С. Янюшкин//Современные проблемы в технологии машиностроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009 – С. 42 – 45.

Поступила в редколлегию 30.01.2024 г.

**И. П. Акула**, канд. техн. наук, **Н. М. Чекан**, канд. техн. наук, **Е. В. Овчинников**, д-р техн. наук.

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь*

*ОАО «Белкард», г. Гродно, Беларусь*

*Тел./Факс: +375 (152) 684108; E-mail: [ovchin@grsu.by](mailto:ovchin@grsu.by)*

## **МОРФОЛОГИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ РЕФРАКТОРНЫХ МЕТАЛЛОВ**

*В статье рассмотрена морфология высокоэнтروпийных покрытий, формируемых с применением вакуумных технологий на стальных подложках из низкоуглеродистой стали. Изучение методами атомно-силовой, оптической микроскопии морфологии поверхностных слоев покрытий TiAlSi (N, C), сформированных на подложках из низкоуглеродистой стали позволило установить зависимость морфологических параметров покрытий от энергетических параметров и химического состава подложки. Показана также зависимость морфологических параметров покрытий от условий формирования вакуумных слоев на низкоуглеродистых стальных субстратах.*

**Ключевые слова:** покрытие, вакуум, морфология, свойства, низкоуглеродистая сталь.

**I. P. Akula, N. M. Chekan, Y. V. Auchynnika**

## **COMPUTER SIMULATION OF HEAVY LOADED FRICTION UNITS OF CARDAN GEARS**

*The article examines the morphology of high-entropy coatings formed using vacuum technologies on low-carbon steel substrates. Studying the morphology of the surface layers of TiAlSi (N, C) coatings formed on low-carbon steel substrates using atomic force and optical microscopy methods made it possible to establish the dependence of the morphological parameters of the coatings on the energy parameters and chemical composition of the substrate. The dependence of the morphological parameters of coatings on the conditions for the formation of vacuum layers on low-carbon steel substrates is also shown.*

**Keywords:** coating, vacuum, morphology, properties, low-carbon steel.

### **1. Введение**

В связи с экономическими требованиями дальнейшего повышения эффективности производственных процессов, важно использовать весь потенциал применения сверхтвердых покрытий. TiN и покрытия на его основе широко используются в качестве защитного материала для режущих инструментов, форм и механических компонентов в машиностроительной промышленности. Низкая химическая активность этих твердых покрытий при нанесении на обрабатываемый инструмент резко снижает адгезионное взаимодействие в процессе формоизменения изделия и, тем самым, уменьшает износ. Наиболее распространенными и износостойкими покрытиями являются покрытия с химической формулой Ti-X-(N, C и B) (X = Al, Cr, C, Si, B и т. д.), которые доказали свою высокую эффективность, особенно в процессе резания, формования и штамповки. В связи с этим были разработаны наноструктурированные твердые покрытия, которые широко используются в качестве износостойких, защитных покрытий [1, 2].

Свойства широко распространенного покрытия TiN можно значительно улучшить введением других элементов, таких как Al или Si. Включение Al в структуру ГЦК-TiN приводит к образованию покрытий TiAlN, характеризующихся высокой твердостью (около 32 ГПа) и высокой стойкостью к окислению (до 800 °C). Учитывая уникальные свойства многокомпонентных покрытий, получаемых плазмохимическим

осаждением, возможно сформировать покрытия  $AlTiSiN$  на малоуглеродистых высоколегированных сталях аустенитного класса.

Покрытия на базе «классических алтинов» высокоэффективны для металлообрабатывающего инструмента, который используется при обработке коррозионностойких металлов, сплавов на основе никеля и титана.

Обычно для формирования таких покрытий применяют два катода, изготовленных из титана и алюминия. Однако возможно использование катода из сплава на основе титана и алюминия, но в данном случае возникают технологические проблемы по совмещению данных материалов в сплаве, чтобы получить гомогенизированную структуру катода [3, 4]. Варьируя составы катодов, условия осаждения покрытий, возможно добиться формирования покрытий стехиометрического состава  $Ti_{1-x}Al_xN$ . Данный состав вакуумных многокомпонентных покрытий позволяет достичь значений микротвердости, находящихся в пределах 39 – 42 ГПа. Прочностные характеристики зависят от растворимости химических элементов, составляющих сплав покрытия, в решетке нитридов. В случае высокой концентрации алюминия в составе покрытия формируется гексагональная решетка типа вюрцита. Данный тип решетки характерен для соединений нитридов алюминия. Низкое содержание алюминия, т.е. менее 0,5 приводит к формированию структуры типа хлорида натрия, образуется твердый раствор на базе кубического нитрида титана.

Осаждение покрытий на основе алтинов в большинстве случаев проводится без фильтрации вакуумно-дуговой плазмы. Использование систем для осуществления фильтрации вакуумно-плазменного потока позволяет существенно увеличить эксплуатационный ресурс металлообрабатывающего инструмента. В частности, формирование фильтрованного покрытия  $Ti_{0,5}Al_{0,5}N$  позволило увеличить эксплуатационный ресурс режущего инструмента от 4 и более раз. Вопрос синтеза покрытий с фильтрованным плазмо-химическим потоком, состоящим из ионов, электронов и нейтральных частиц недостаточно исследован, что в ряде случаев ограничивает применение данного технологического подхода для формирования покрытий на основе систем  $Al-Ti-N$  [5, 6].

Добавление углерода в  $AlTiSiN$  приводит к образованию  $AlTiSi(NC)$  покрытия, что повышает износостойкость по сравнению с покрытиями  $TiAlN$  и  $TiBN$  [7]. Однако оксидные слои, образующиеся в зоне трибоконтакта, не всегда эффективно снижают значение силы трения и износ контактирующих материалов, которые зависят от морфологии покрытий. В связи с этим представляет интерес изучить морфологию получаемых многокомпонентных покрытий методами оптической микроскопии.

## 2. Методика эксперимента

В качестве объекта исследований использовали покрытия  $AlTiSi$  (C, N) покрытия. Нанесение покрытий осуществлялось в вакуумной установке УВНИПА-1-001, оборудованной катодно-дуговым испарителем с системой электромагнитной фильтрации плазмы, а также ионным источником ИИ-4-0,15. Для удаления тонкого приповерхностного слоя толщиной порядка 100 – 300 нм, содержащего загрязнения, перед нанесением покрытия образцы подвергались интенсивной обработке высокоэнергетичными ионами аргона. При этом происходит нагрев поверхностей до 450 С, разрушение окисных пленок и частичное удаление растворенных в металле газов. В качестве подложек использовали сталь 20. Поверхность подложек из стали шлифовке и полировке до чистоты не ниже 8 – 10 класса.

Обработка проводилась при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере  $1,5 \times 10^{-2}$  Па; ток фокусирующего соленоида 3,0 А; ускоряющее напряжение 3500 В при токе 0,06 А. Время ионно-лучевой обработки составляло 30 мин. Для повышения эффективности ионно-лучевой очистки и увеличения глубины проникновения ионов аргона на обрабатываемые изделия подавался отрицательный электрический потенциал 800 – 1500 В. Осаждение покрытия проводилось при токе стабилизирующей катушки 1,7 А, токе управляющей катушки 2,0 А и токе дуги 90 А. Давление реакционного газа (азот) находилось в пределах  $(0,87 - 5) \times 10^{-2}$  Па.

Условия формирования покрытий в зависимости от номера субстрата следующие: покрытие на образце №1 – слой AlTiSi (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В); №2 – слой AlTiSi (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В) + слой AlTiSiN (ток 55 А, напряжение смещения минус 50 В,  $P_{N_2} \sim 1,1 \cdot 10^{-2}$  Па); №3 – слой AlTiSi (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В) + слой AlTiSiN (ток 55 А, напряжение смещения минус 50 В,  $P_{N_2} \sim 1,8 \cdot 10^{-2}$  Па); №4 – слой AlTiSi (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В) + слой AlTiSiNC (ток 55 А, напряжение смещения минус 50 В,  $P_{N_2} \sim 1,8 \cdot 10^{-2}$  Па,  $P_{C_2H_2} \sim 0,8-1,0 \cdot 10^{-2}$  Па).

Особенности морфологии поверхностных слоев в нанокпозиционных покрытиях функционального назначения исследовали с привлечением современных методов: растровой электронной, атомно-силовой микроскопии по стандартным методикам.

### 3. Результаты исследований

На рисунках 1, 2 представлены данные оптических исследований покрытий AlTiSi(CN), сформированных на поверхности низкоуглеродистой стали 20.

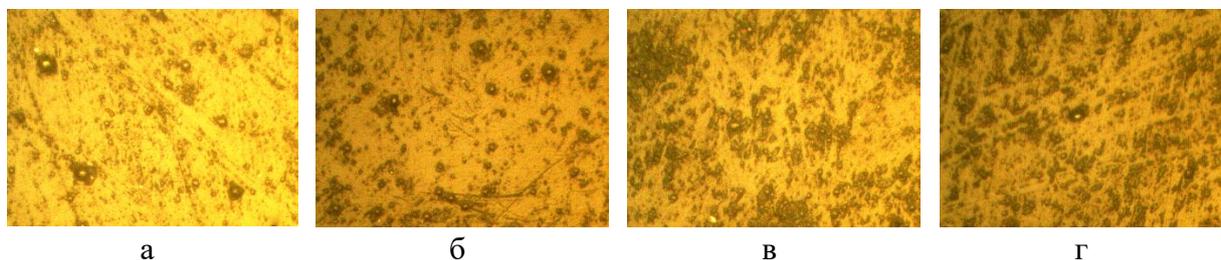


Рисунок 1. Морфология покрытий AlTiSi (NC), сформированных на стали 20, в зависимости от технологии получения: а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4.  $\times 500$

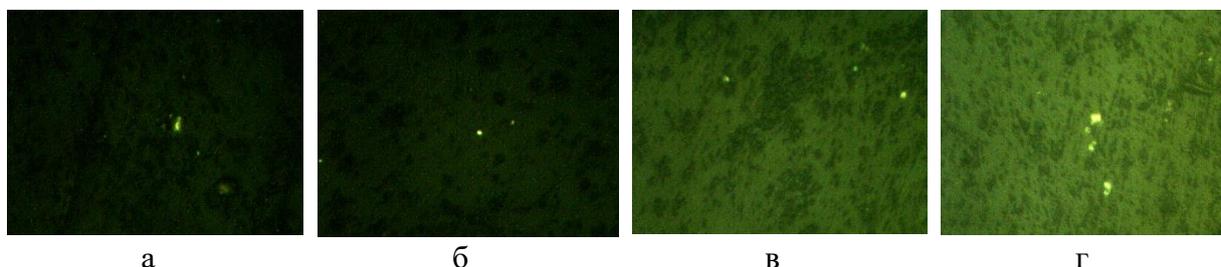


Рисунок 2. Морфология покрытий AlTiSi (NC), сформированных на стали 20, в зависимости от технологии получения: а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4 (снимки сделаны в поляризованном свете).  $\times 500$

Согласно полученных данных, в покрытии возможно наличие трех фаз: основной матрицы, скорее всего, это соединения на основе (Ti, Al) (фаза №1), затем сложные нитриды или карбиды металлов (включения более темного цвета, фаза №2), частицы металлов (включения светлого цвета, фаза №3). Распределение включений в матрице неравномерное и зависит от условий формирования покрытий (рисунок 3).

Проведенный анализ концентрации данных фаз в структуре покрытия показал увеличение нитридных и карбидных оставляющих с увеличением концентрации углерода и азота в вакуумной камере при формировании данных защитных слоев. Анализ проводился с использованием программы Autoscan производства ЗАО «Спектроскопические системы» г. Минск.

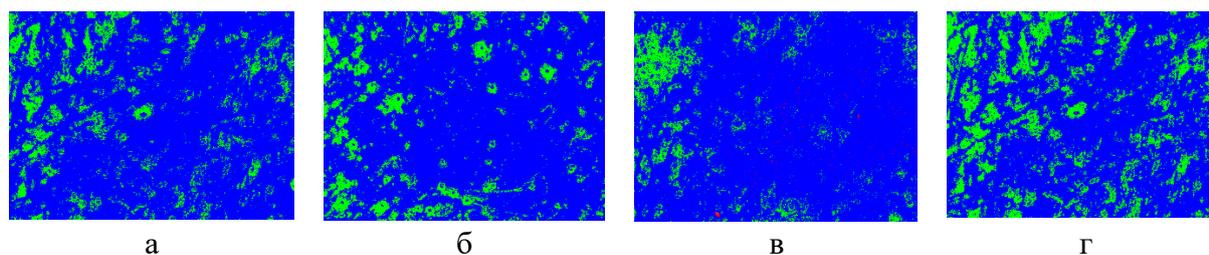


Рисунок 3. Фазовый анализ покрытий AlTiSi (NC), сформированных на стали 20, в зависимости от технологии получения: а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4; фаза.

1 –синий цвет; фаза 2 – зеленый цвет; фаза 3 –красный цвет. ×500

На рисунках 4, 5 представлено процентное распределение фаз в покрытиях AlTiSi (NC).

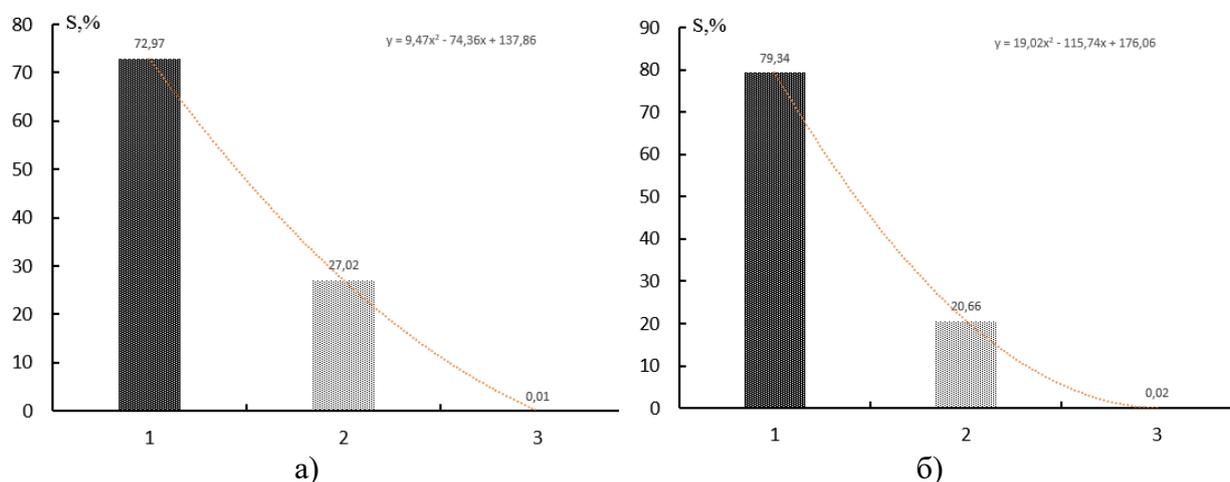


Рисунок 4. Концентрация фаз в вакуумном высокоэнтропийных покрытиях: а – покрытие №1, б-покрытие №2

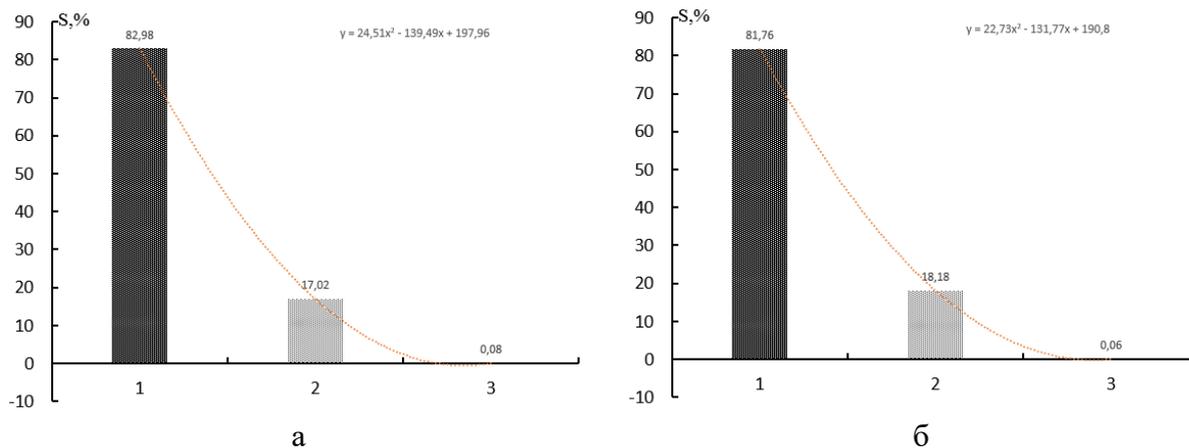


Рисунок 5. Концентрация фаз в вакуумном высокоэнтропийных покрытиях. а- покрытие №3, б-покрытие №4

С помощью программного пакета «AutoscanStudio» было построено обеспечения изображение рельефа изучаемых образцов (рисунок 6).

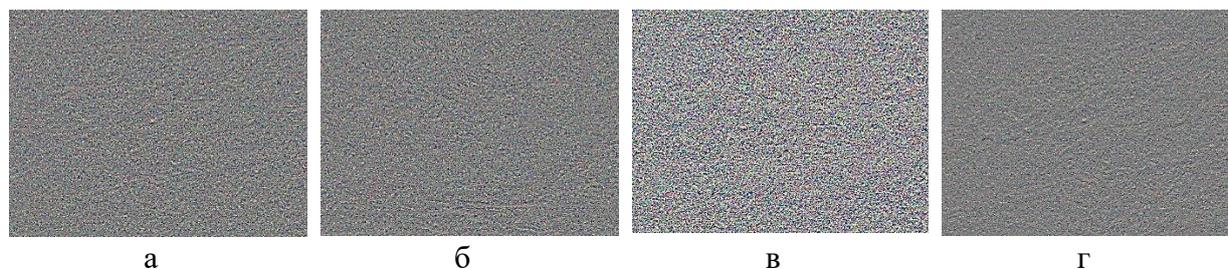
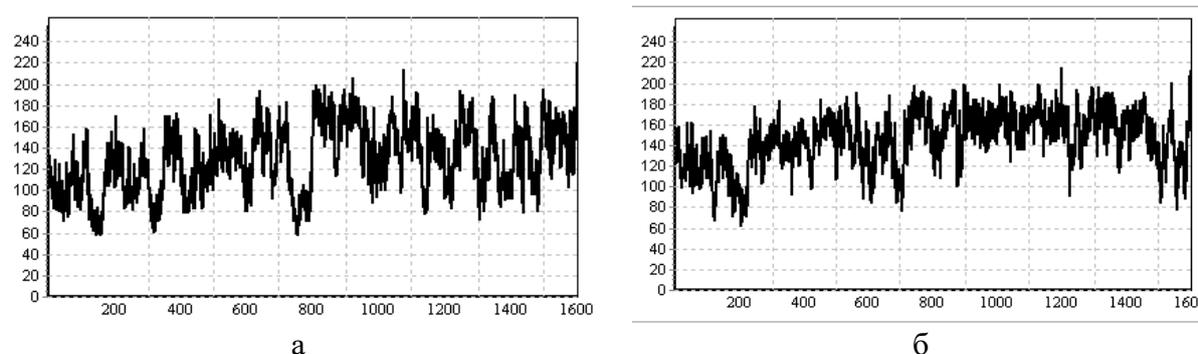


Рисунок 6. Рельеф плазмохимических вакуумных покрытий AlTiSi (NC): а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4. ×500

Согласно полученных данных, в поверхностных слоях покрытий наблюдаются глобулярные включения, находящиеся в области от 0,1 мкм до 3 мкм. Таким, образом исходя из современного определения наночастиц, методами оптической микроскопии показано наличие нанообъектов при формировании покрытий AlTiSi (С,Т).

Также была проанализирована шероховатость сформированных покрытий с помощью программного пакета «AutoscanStudio». Результаты исследований представлены на рисунке 7.



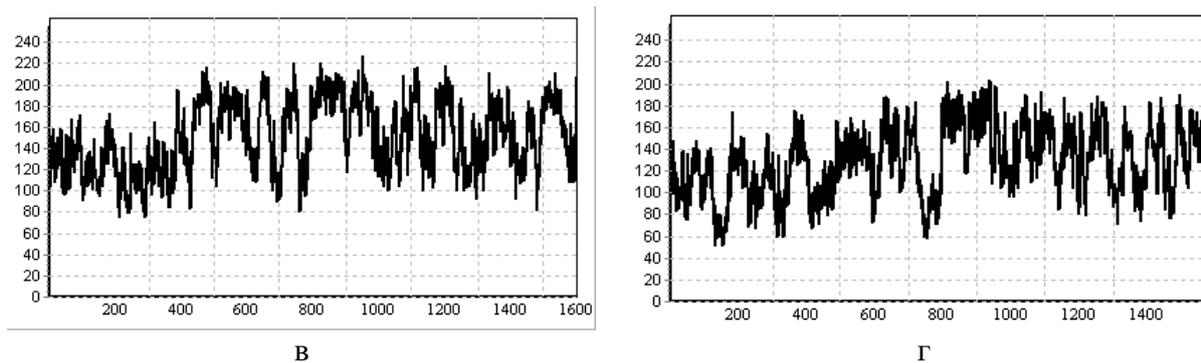


Рисунок 7. Шероховатость плазмохимических вакуумных покрытий AlTiSi (NC): а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4.  $\times 500$

Исходя из данных оптической микроскопии, шероховатость сформированных покрытий различается в зависимости от режимов получения покрытий. Наблюдается наличие объектов, которые можно отнести к наночастицам, а также более крупные агломераты. Данные структурные объединения состоят в большинстве своем из групп наночастиц. Согласно данным представленных в работе [8] при формировании высокоэнтропийных покрытий на субстрате из углеродистой стали 45, в структуре покрытий образуется достаточно большое количество образований сферической формы, латеральные размеры которых находятся в нанодиапазоне. Размеры и форма получаемых образований зависит от технологических режимов формирования покрытий. Так, морфология покрытия AlTiSi характеризуется большим количеством крупных глобулярных образований с невысокой высотной характеристикой по оси Z [8]. Введение в вакуумную камеру азота приводит к дальнейшему укрупнению глобулярных структур с увеличением размеров по оси Z, с уменьшением концентрации в поверхностных слоях покрытия. Увеличение концентрации азота в вакуумной камере при формировании покрытия приводит (образец №3 с покрытием) к увеличению концентрации сферических образований с уменьшением латеральных размеров в плоскости XY. Условия формирования покрытий оказывают существенное влияние на морфологию, формируемых защитных слоев на субстратах из стали 45 [8]. Таким образом, независимо от состава стальных подложек и условий осаждения в высокоэнтропийных покрытиях формируются наночастицы и нанофазы. Однако количество нанообъектов и их размеры зависят от условий формирования покрытий и химического состава субстрата.

#### 4. Заключение

Согласно данным оптической и растровой электронной микроскопии, в структуре покрытий образуется достаточно большое количество глобулярных образований, размеры и концентрация которых зависит от технологии формирования и химического состава покрытий. В результате осаждения материала покрытий в вакууме с использованием ионно-плазменного потока в структуре покрытий формируются нанофазные объекты, которые должны приводить к существенным изменениям прочностных и адгезионных характеристик осаждаемых слоев.

В покрытиях AlTiSi (C, N) наблюдается большое количество включений, находящихся по размерам в микронной области. Данные образования являются агломератами более низкоразмерных частиц. Возможно, данные частицы являются

фазами трехкомпонентных и более соединений, наподобие МАХ-фаз. Проведенный анализ по определению количества данных частиц в исследуемых образцах показал зависимость количества данных частиц от условий формирования покрытий. Исходя из представленных данных, в структуре покрытий образуется достаточно большое количество образований сферической формы, латеральные размеры которых находятся в нанодиапазоне.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Wang X., Kwon P. Y., Schrock D. Friction coefficient and sliding wear of AlTiN coating under various lubrication conditions // *Wear*. – 2013. – Vol. 304. – P. 67–76.
2. Chen L. [et al.] Effect of bilayer period on structure, mechanical and thermal properties of TiAlN/AlTiN multilayer coatings // *Thin Solid Films*. – 2015. – Vol. 592. – P. 207–214.
3. Овчинников Е. В. [и др.] Триботехнические характеристики покрытий на основе карбонитрида циркония, подвергнутых криогенной обработке // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. – 2018. – Т. 18. № 2. – С. 358–362.
4. Овчинников Е. В. [и др.] Физико-механические характеристики вакуумных покрытий, обработанных при криогенной температуре // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. – 2018. – Т. 8. № 2. – С. 6–16.
5. Hsu Cheng-Hsun [et al.] Effect of (Ti, Al) N Nanostructured Arc-Coatings on Wear and Corrosion Properties of 4340 Alloy Steel. // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2018. – Vol. 18. – P. 2823-2829.
6. Овчинников Е. В., Чекан Н. М., Акула И. П. /Триботехнические характеристики плазмохимических покрытий AlTiN / *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. - 2014. -№ 1 (303). - С. 55-63.
7. Fei G. [et al.] Improved adhesion and cutting performance of AlTiSiN coatings by tuning substrate bias voltage combined with Ar ion cleaning pre-treatment // *Ceram. Int.* – 2018. – Vol. 44. – P. 18894–18902.
8. Овчинников Е. В. [и др.] Морфологические особенности высокоэнтропийных вакуумных покрытий // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. – 2023. – № 2 (81). – С. 35-44.

Поступила в редколлегию 31.01.2024 г.

УДК 675.055.165.001.76

Г. А. Бахадиров<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., Г. Н. Цой<sup>2</sup>, канд. техн. наук,  
А. М. Набиев<sup>3</sup>, PhD., Р. Т. Сахыбаев<sup>4</sup>, докторант (PhD)

<sup>1-3</sup>Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М. Т. Уразбаева  
Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

<sup>4</sup>Таразский региональный университет имени М. Х. Дулати, Тараз, Казахстан  
Тел./Факс: (+99871) 262-71-52; E-mail: [instmech@rambler.ru](mailto:instmech@rambler.ru)

## МАШИНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ УПРУГОВЯЗКИХ МАТЕРИАЛОВ

*В работе приведено устройство и принцип работы усовершенствованной конструкции машины для обезвоживания влагонасыщенных упруговязких материалов. Экономическая эффективность предлагаемой машины заключается в том, что повышается эффективность удаления избыточного содержания влаги из влагонасыщенных упруговязких материалов. Повышается долговечность транспортных элементов и производительность машины.*

**Ключевые слова:** упруговязкий материал; привод транспортера; удаляемая жидкость; ультразвуковой излучатель; производительность.

G. A. Bahadirov, G. N. Tsoy, A. M. Nabiev, Sakhybaev R. T.

## MACHINE FOR PROCESSING ELASTIC-VISCOUS MATERIALS

*The work describes the device and operating principle of an improved design of a machine for dehydration of moisture-saturated elastic-viscous materials. The economic efficiency of the proposed machine lies in the fact that the efficiency of removing excess moisture from moisture-saturated elastic-viscous materials increases. Increases the durability of conveyor elements and machine productivity*

**Keywords:** elastic-viscous material; conveyor drive; liquid to be removed; ultrasonic emitter; performance.

### 1. Введение

В настоящее время все больше расширяются требования к готовой продукции производства, и к качеству наряду с совершенствованием процессов обработки. Это в свою очередь связано с решением ряда вопросов по осуществлению мероприятий технического и технологического обновления на обрабатывающих предприятиях и кластерах. Исходя из этого, можно обосновать необходимость совершенствования оборудования механической обработки, в частности обезвоживания волокнистого материала [1–3].

Следовательно, нами разработана машина для механической обработки упруговязких материалов. Целью разработки является повышение качества обработки и выхода площади материалов [4–6]. Машина предназначена для повышения эффективности удаления влаги из влагонасыщенных упруговязких материалов и повышение производительности машины.

### 2. Основное содержание и результаты работы

Технико-экономическая эффективность от использования усовершенствованной конструкции машины достигается за счет повышения интенсификации технологического процесса обезвоживания влагонасыщенных упруговязких материалов. Повышается производительность машины [7–9].

Техническими отличиями машины от аналогов являются следующие:

а) установка между двумя горизонтально расположенными на одном уровне по высоте отжимными валами установлен ультразвуковой излучатель в полый транспортной плите с водой и соединенный с ультразвуковым генератором;

- б) выполнение боковых поверхностей полой транспортной плиты плоскими;
- в) выполнение боковых поверхностей полой транспортной плиты параболическими;
- г) установка двух отдельных транспортеров для перемещения транспортных плит с упруговязкими материалами;
- д) выполнение транспортной плиты для установки влагонасыщенного упруговязкого материала в виде штанги, на которой установлен влагоотводящий волокнистый материал;
- е) возможность одновременной работы двух подающих транспортеров [10–14].

Технический результат от эксплуатации машины достигается следующим образом:

- а) установкой на станину двух горизонтально расположенных отжимных валов;
- б) установкой между отжимными валами полой транспортной плиты с водой, где установлен и закреплен ультразвуковой излучатель, который соединен проводами с генератором;
- в) выполнением боковых поверхностей полой транспортной плиты параболическими.

Предлагаемая машина поясняется следующими схемами. На рис. 1 показан вид сверху на машину. На рис. 2 показано вертикальное сечение А–А поперек машины. На рис. 3 показан боковой вид–А на привод машины со стороны электродвигателя. На рис. 4 показан вид–Б на привод с обратного бокового вида машины.

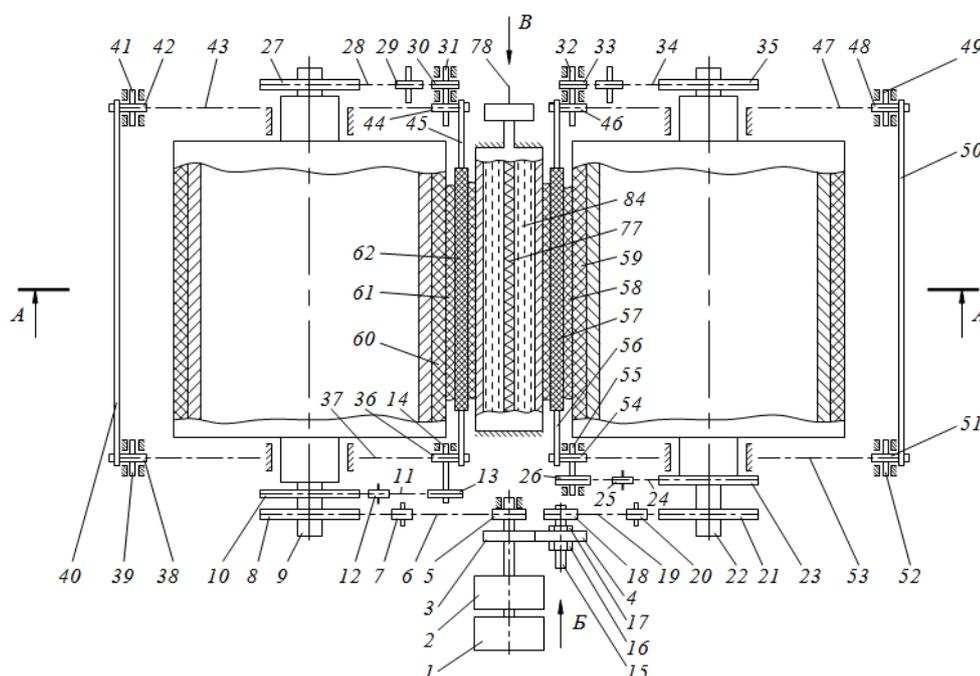


Рисунок 1. Схема машины для обработки упруговязких материалов

Машина для удаления влаги из влагонасыщенных упруговязких материалов состоит из электродвигателя 1 с редуктором 2, на котором установлена шестерня 3, которая контактирует с шестерней 4 установленной на валу 15. А звездочка 5 на редукторе 2 цепью 6 контактирует со звездочками 7 и звездочкой 8 на отжимном

вала 9 [15–18]. Для привода цепного транспортера на отжимном валу 9 установлена звездочка 10, которая через цепи 11 контактируется со звездочкой 12 и 13, причем звездочка 13 установлена на оси звездочки 36 цепи 37 транспортера, которая контактируется со звездочкой 38 на оси 39. Аналогично, на втором конце отжимного вала 9 установлена звездочка 27, которая цепью 28 контактируется со звездочкой 29 и 30 на оси 31, причем на оси 31 установлена звездочка 44, которая контактируется цепью 43 со звездочкой 42 на оси 41 подающего транспортера.

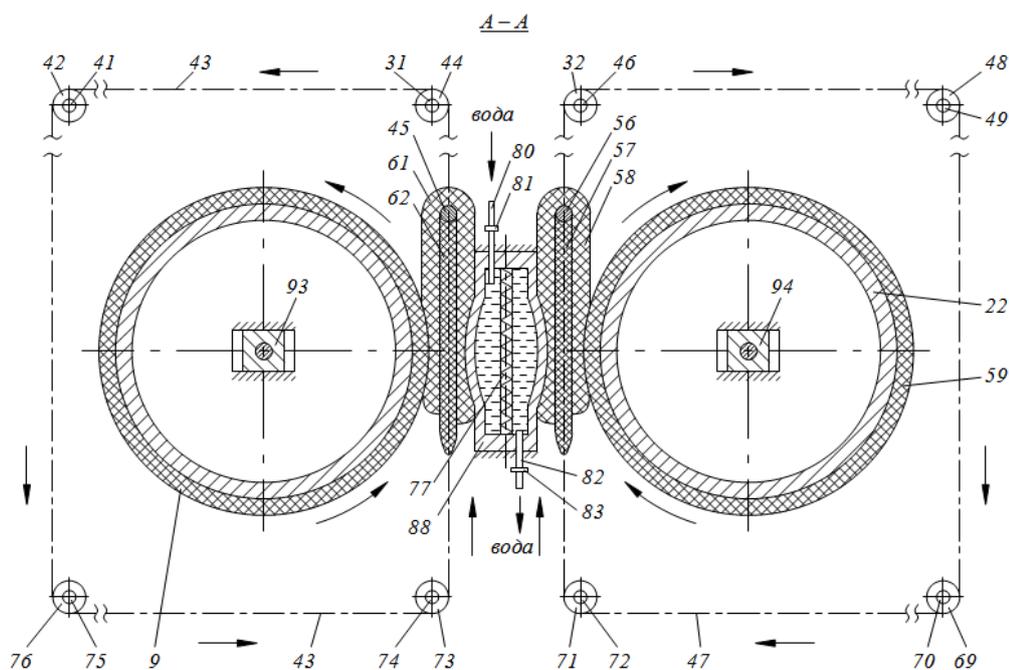


Рисунок 2. Общая схема машины транспортировки при обработке упруговязких материалов

На оси цепи 43 установлен один конец штанги 40, а второй конец установлен на оси цепи 38 установленный на оси 39. Также штанга 45 устанавливается на ось цепи 37 и 43. На штанги 40, 45 и другие устанавливаются влагоотводящий материал 62 и затем влагонасыщенный упруговязкий материал 61 вперегиб. Звездочка 7 с цепью 6, звездочка 12 с цепью 11 и звездочка 29 с цепью 28 предназначены для натяжения их цепей пружинами 89, 91 соответственно. А натяжение цепи 28 осуществляется пружиной 86. Рассмотрена одна ветвь цепного транспортера [19–21].

Рассмотрим вторую ветвь цепного транспортера. Вращение шестерни 3 на редукторе 2 передается на шестерню 4 на оси 15. Звездочка 18 установлена на ось 15 и контактируется со звездочками 20 и 21 на отжимном валу 22 с помощью цепи 25. На отжимной вал установлен звездочка 23, которая цепями 24 контактируется со звездочками 25 и 26. На оси 55 установлена звездочка 54, которая цепью 53 контактируется со звездочкой 51 на оси 52. На второй конец вала 22 установлена звездочка 35, которая контактируется с цепью 34 со звездочкой 33 на оси 32. На ось 32 установлена звездочка 46 цепью 47 контактируется со звездочкой 48 на оси 49. Штанги 50 и 56 устанавливаются на оси транспортирующих цепей 47 и 53. Натяжение цепей 19

и 24 осуществляются соответственно пружинами 92 и 85, а натяжение цепи 34 осуществляется пружиной 87.

На цапфах отжимных валов 9 и 22 со стороны электродвигателя 1 соответственно установлены опоры 93 и 94, а на противоположном боку установлены соответственно опоры 95 и 96.

На полуу транспортерную плиту 88 установлена труба 80 с краном 81 для подачи воды 84 в ее полость. Для отвода нагретой воды из полости транспортерной плиты 88 на нее установлена труба 82 с краном 83.

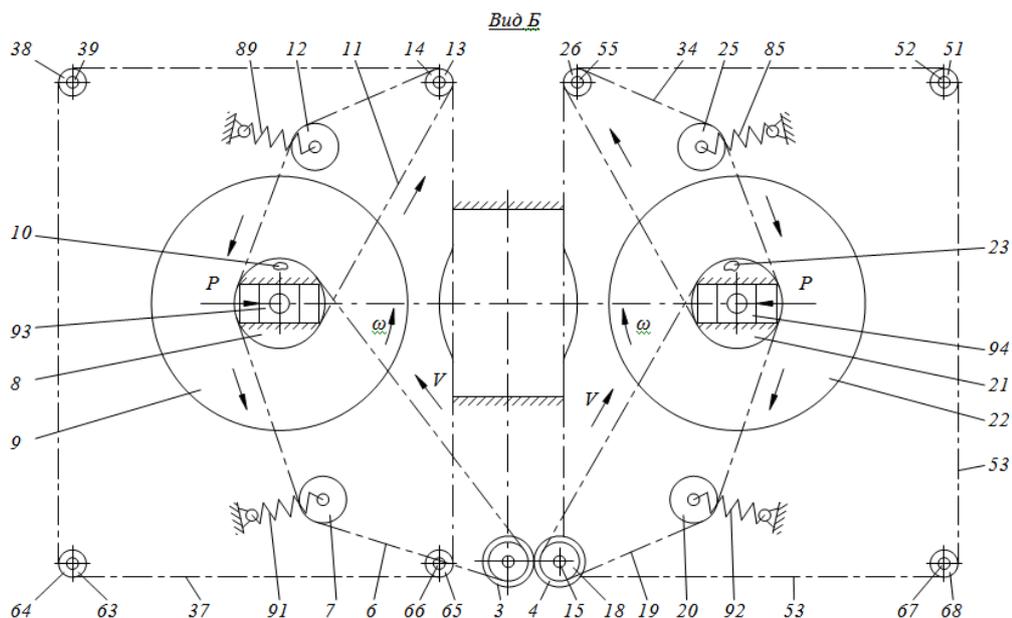


Рисунок 3. Общая схема привода машины

Машина для обезвоживания влагонасыщенных упруговязких материалов работает следующим образом:

Предварительно даем давление  $P$  на отжимные валы 9, 22. В полость полой транспортерной плиты 88 устанавливаем ультразвуковой излучатель 77, затем заливается жидкостью 44.

На штанги 40, 45, 50, 56 навешиваем на волокнистый, влагоотводящий материал 57, влагонасыщенный упруговязкий материал 58. Включают ультразвуковой излучатель 78.

Включают электродвигатель 1, тогда вращение от двигателя передается к редуктору 2. Далее движение передается цепью 6 через звездочку 5, звездочки 7 и 8 движение отжимному валу 9. Далее через звездочки 10 на отжимном валу 9 движение передается цепью 11 звездочкам 12 и 13, а через звездочку 36 на оси 14 цепью 37 передается звездочке 38 на оси 39. Вращение отжимного вала 9 на другом конце передается шестерней 27 через цепь 28 и звездочек 29 и 30 на оси 31 к звездочке 44, которая передает движение звездочке 42 на оси 41. Штанги 40 и 45 на осях цепей 37 и 43 с влагонасыщенным упруговязким материалом перемещается против часовой стрелки снизу вверх между отжимным валом 9 и боковой стенкой полой транспортерной плиты 88. Под воздействием давления прижима  $P$  и ультразвуковых

колебаний на транспортерную плиту 77 жидкость во влагонасыщенном упруговязком материале начинает совершать колебательные движения при этом снижается ее вязкость и соответственно сила трения при удалении избыточной влаги из влагонасыщенных упруговязких материалов. Это приводит к ускорению процесса удаления влаги из влагонасыщенных упруговязких материалов.

Далее рассмотрим второй цепной транспортер с цепями 37 и 53. Движение от электродвигателя 1 и редуктора 2 через шестерни 3 и 4 вращает вал 15, на котором установлена звездочка 18, которая цепью 19 вращает звездочки 20 и 21 на отжимном валу 22. Шестерня 4 зафиксирована на валу 15 гайками 16 и 17. Шестерня 23 на отжимном валу 22 цепью 24 вращает звездочки 25 и 26. На валу 55 установлена звездочка 54, которую огибает цепь 53 звездочку 52. На втором конце отжимном валу 22 установлена звездочка 35, которая цепью 34 контактирует со звездочкой 33 и 90.

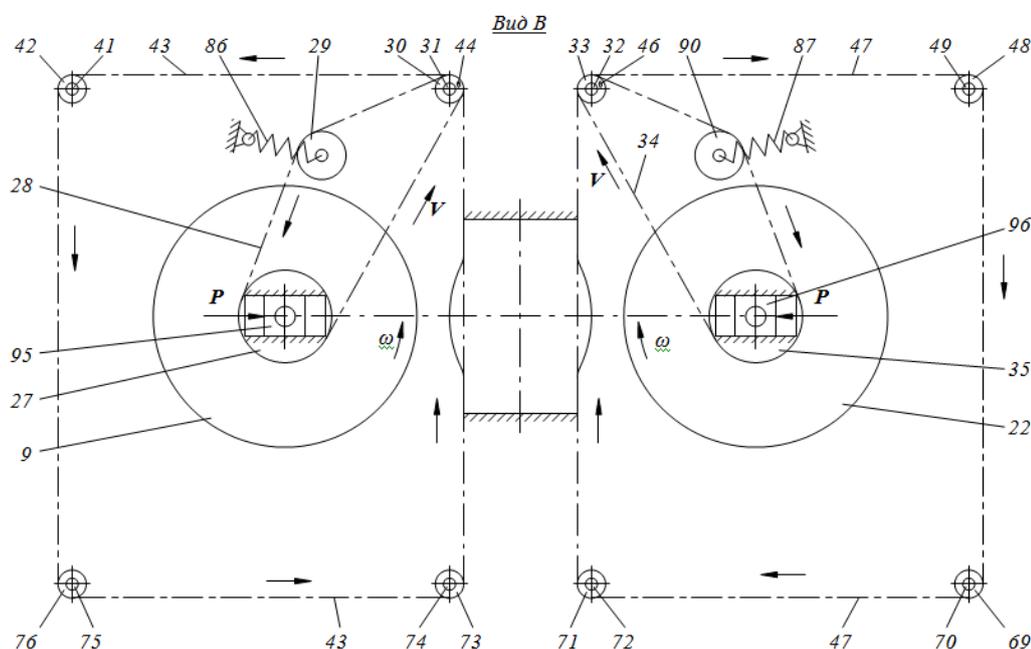


Рисунок 4. Схема привода рабочих валов машины

На оси 32 звездочка 46 цепью контактирует со звездочками 48 на оси 49. Штанги 50 и 56 с влагонасыщенными упруговязкими материалами 58 переносятся по часовой стрелке снизу вверх и подпадает под отжимные валы 22 и полый транспортерной плитой 88. Под воздействием давления  $P$  вала 22 и ультразвуковых колебаний от излучателя 77 влага во влагонасыщенном упруговязком материале 58 начинает совершать колебательные движения при этом снижается вязкость жидкости и соответственно уменьшается коэффициент трения. Это приводит к увеличению удаления влаги из влагонасыщенных упруговязких материалов 58. Схема привода обеспечивает обезвоживание в широком диапазоне толщин пакета штанги с влагоотводящим волокнистым материалом и влагонасыщенным упруговязким материалом 58. Если необходимо обезвоживание влагонасыщенных упруговязких материалов только с одним подающим транспортером, то возможно будет снять временно цепь 6.

### 3. Общие рекомендации

В процессе обезвоживания происходит интенсификация удаления влаги и повышается производительность машины за счет одновременной подачи и обезвоживания двух влагонасыщенных упруговязких материалов между отжимными валами и с боковыми поверхностями транспортерной плиты.

### 4. Заключение

Таким образом, достигается расширение функциональных возможностей машины, следовательно, повышается производительность и долговечность влагоудаляющего материала. Повышается эффективность удаления избыточной влаги из влагонасыщенных упруговязких материалов и повышается производительность технологического процесса и машины в целом.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Крылов, А. В. Определение математической модели зависимости потребляемой мощности на привод валкового модуля от факторов / А. В. Крылов, И. Ю. Шахова, А. А. Тувин, Ю. Г. Фомин // Технология текстильной промышленности №3 (381) 2019. – С. 133-135.
2. Шардарбек, М. Ш. Устройства для перегрузки сырья / М. Ш. Шардарбек, Р. Т. Кауымбаев, Н. П. Чернявская, Г. Б. Демеуова, Ж. С. Рахманова, В. М. Шаламанова // Технология текстильной промышленности № 2 (386) 2020. – С. 146-149.
3. Крылов, А. В. Анализ затрат мощности в системе привода валковых модулей машин / А. В. Крылов, И. Ю. Шахова, А. А. Тувин, Ю. Г. Фомин // Технология текстильной промышленности №4 (382) 2019. – С. 128-130.
4. Подъячев, А. В. Свободные колебания валов валковых механизмов текстильных машин / А. В. Подъячев, С. В. Бойко // Технология текстильной промышленности №3 (375) 2018. – С. 143-147.
5. Крылов, А. В. Фрикционное взаимодействие валов модулей в зоне контакта / А. В. Крылов, Т. П. Туцкая, Ю. Г. Фомин, Г. А. Хосровян // Технология текстильной промышленности №5 (371) 2017. -С. 181-184.
6. Appiah-Brempong, M., Essandoh, H.M.K., Asiedu, N.Y. et al. An insight into artisanal leather making in Ghana. *J Leather Sci Eng* 2, 25 (2020). <https://doi.org/10.1186/s42825-020-00039-8>
7. Патент на полезную модель KZ №8563. «Технологическая машина для отжима влаги из кожи». Авторы: Сахыбаев Б. Т., Бахадиров Г. А., Набиев А. М., Цой Г. Н. Опубл. в Бюл. 23.10.2023 г.
8. Amanov, A., Bahadirov, G., Amanov, T., Tsoy, G., Nabiev, A. Determination of Strain Properties of the Leather Semi-Finished Product and Moisture-Removing Materials of Compression Rolls. *Materials (Basel)*. 2019. 12 3620. <https://doi.org/10.3390/ma12213620>
9. Amanov, A. T., Bahadirov, G. A., Nabiev, A. M. A Study on the Pressure Mechanism Improvement of a Roller-Type Machine Working Bodies. *Materials*. 2023; 16(5):1956. <https://doi.org/10.3390/ma16051956>
10. Bahadirov, G., Tsoy, G., Nabiev, A. Study of the efficiency of squeezing moisture-saturated products. *EUREKA: Physics and Engineering*, (1), 2021, pp. 86–96: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001606>
11. Bahadirov, G., Sultanov, T., Tsoy, G., Nabiev, A. Experimental dehydration of wet fibrous materials. *E3S Web Conf. Volume 264*, 2021. International Scientific Conference

“Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (Conmechhydro - 2021). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404060>

12. Бахадиров Г. А., Набиев А. М. Классификация и анализ опорных плит валковой машины // 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. – 368 с.

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

14. Бахадиров, Г. А. Техника и технология для обработки кожсырья / Г. А. Бахадиров, Г. Н. Цой, А. М. Набиев. – Новосибирск : Общество с ограниченной ответственностью "Сибирская академическая книга", 2023. – 214 с. – ISBN 978-5-605-05493-1. – EDN BPGDBU.

15. Усовершенствованная технологическая машина валкового типа / Г. А. Бахадиров, А. М. Набиев, Г. Н. Цой, Р. Т. Сахыбаев // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения : Сборник научных трудов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Тула, 13–15 ноября 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 233-236. – EDN WWVDQN.

16. Определение параметров цепного транспортирующего устройства валковой машины / Г. А. Бахадиров, А. М. Набиев, Ф. Р. Рахимов, М. У. Мусиров // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 5(407). – С. 168-174. – DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_168. – EDN UUGCRC.

17. Бахадиров, Г. А. Совершенствование разбивочной машины / Г. А. Бахадиров, Г. Н. Цой, А. М. Набиев // Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития: Материалы юбилейной Международной конференции, Могилев, 11–12 ноября 2021 года. – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-Российский университет", 2021. – С. 181-182. – EDN HVGKFU.

18. Экспериментальный механизм давления валкового стенда / Г. А. Бахадиров, Г. Н. Цой, А. М. Набиев, А. А. Умаров // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. – № 2(73). – С. 3-8. – EDN YEOQSR.

19. 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. – 2018. – № 9. – С. 9-14. – EDN OZVUKJ.

20. Бахадиров, Г. А. Автоматическое управление обработкой волокнистых материалов / Г. А. Бахадиров, Г. Н. Цой, А. М. Набиев // Инновации в технологиях и образовании : Сборник статей участников XIII Международной научно-практической конференции, Белово, 26 марта 2020 года. Том 1. – Белово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2020. – С. 40-43. – EDN AEULHE.

21. Omar Gamal, Mohamed Imran Peer Mohamed, Chirag Ghanshyambhai Patel, and Hubert Roth, "Data-Driven Model-Free Intelligent Roll Gap Control of Bar and Wire Hot Rolling Process Using Reinforcement Learning," International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 10, No. 7, pp.349-356, July 2021. DOI: 10.18178/ijmerr.10.7.349-356.

Поступила в редколлегию 02.02.2024 г.

УДК 531.51;620.1

**А. И. Бохонский**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., **Н. И. Варминская**<sup>2</sup> канд. техн. наук<sup>1</sup> СевГУ, г. Севастополь, Россия;<sup>2</sup> ЧВВМУ имени П.С. Нахимова, г. Севастополь, РоссияE-mail: [bohon.alex@mail.ru](mailto:bohon.alex@mail.ru); [nvarminska@gmail.com](mailto:nvarminska@gmail.com)

## ДВА ТИПА КОНСТРУИРУЕМЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ УПРУГИХ ОБЪЕКТОВ

Дан краткий обзор классических методов теории оптимального управления поступательным движением упругих объектов с использованием алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления. Проектирование иллюстрируется на примере двух типов управления - гармонической функции поступательного ускорения (управления) и полинома. Численные примеры иллюстрируют достижение абсолютного покоя упругого объекта в конечном состоянии.

**Ключевые слова:** упругий объект, проектирование оптимальных управлений, вариационное исчисление, обратные задачи, поступательные и относительные движения, динамика упругой системы, конечное состояние.

**A. I. Bohonsky, N. I. Varminskaya**

### TWO TYPES OF OPTIMAL MOVEMENTS OF ELASTIC OBJECTS BEING CONSTRUCTED

A brief overview of the classical methods of the optimal control theory of the translational motion of elastic objects using an algorithm for solving the complete inverse problem of the calculus of variations is given. The designing is illustrated using two types of control – a harmonic translational acceleration function (control) and a polynomial. Numerical examples illustrate the achievement of absolute rest of an elastic object in its final state.

**Keywords:** elastic object, designing of optimal controls, calculus of variations, reverse tasks, translational and relative motions, elastic system dynamics, final state.

Общая постановка задач оптимального управления с обоснованием критериев оптимальности и ограничений дана, например, в [1, 2, 3]. В [3] содержится предупреждение: «Если же по физическим соображениям убедительно сформулировать критерий оптимальности не удастся, то целесообразность постановки оптимальной задачи становится более чем сомнительной».

Отметим, что на практике приоритетной является сама цель управления, критериям оптимальности сопутствуют не строгие рассуждения, а их класс весьма ограничен.

Методам управления динамическими колебательными системами с приложениями к различным объектам техники посвящены работы [4-7]. С использованием приближенных методов оптимального управления преодолены трудности моделирования оптимальных колебательных систем грузоподъемных машин и управляемой амортизации роторов [4].

Основам теории оптимального управления посвящена известная работа коллектива авторов [1], в которой дано всестороннее обоснование принципа максимума Понтрягина, и показана область его эффективного применения. Рассмотрены не только математические особенности применения принципа максимума, но и постановки новых оригинальных задач оптимального управления.

Оптимальным колебательным процессам механических систем посвящена монография [6], в которой представлен широкий круг задач с учетом ряда свойств

упругих механических систем – от оптимизации динамических воздействий до поиска форм колеблющихся тел.

Многие задачи управления решены классическими методами вариационного исчисления, например, при поиске оптимальных управлений вибрационными системами. Однако, даже с весьма упрощенной моделью объекта управление усложняется при его практической реализации.

В [8] найдено и исследовано управление (переносное ускорение) упругого объекта при его быстром перемещении из исходного в конечное состояние абсолютного покоя. Аналитическая функция ускорения в виде синуса в нечетной степени исключает колебания упругого объекта при достижении цели движения. Результаты исследований можно использовать, например, при управлении вращением космического объекта с условием исключения колебаний солнечных батарей (в конечном состоянии).

В [9] исследовано управление переносным движением упругих объектов с использованием импульсов ускорений. Обращено внимание на возможность применения таких управлений для оптимального движения крупногабаритных нежестких конструкций в состоянии невесомости.

Синтезу новых оптимальных управляемых переносных движений упругих систем посвящены работы [10, 11], в которых уделено внимание не только совершенствованию алгоритма реверсионного конструирования управлений, но и техническим приложениям результатов. Обобщение результатов конструирования управлений с использованием алгоритмов решения полной обратной задачи вариационного исчисления (от исходной функции как решения уравнения Эйлера до восстановления функционала-критерия) привело к формулированию реверсионного принципа оптимальности (РПО), отражающего существование экстремума функционала-критерия в пределах возможного минимального времени, определяемого из моментных соотношений в относительном движении.

Результаты моделирования динамического поведения упругих объектов при использовании управлений, найденных согласно РПО, отражены в монографии [12].

В учебном пособии [14] «Механика управляемого движения объектов» показано существование широкого класса кососимметричных оптимальных управлений переносным движением объектов техники, полученных с помощью алгоритмов решения полных обратных задач вариационного исчисления.

Полученные результаты исследований нуждаются в систематизации и обобщениях при переходе к рекомендациям по их практическому использованию.

Анализ динамического поведения упругого объекта с одной степенью свободы приведен на характерном примере переносного оптимального движения с двумя типами кососимметричных управлений.

### Пример 1

Используется управление (ускорение), известное из решения задачи вариационным методом при перемещении объекта как абсолютно твердого тела. В этом случае ускорение, скорость и перемещение:

$$U(t) = \frac{6L(T-2t)}{T^3}, \quad V(t) = \frac{6Lt(T-t)}{T^3}, \quad S(t) = \frac{Lt^2(3T-2t)}{T^3}, \quad (1)$$

где:  $L$  – общее перемещение объекта; время  $T$  – находится из моментных соотношений в относительном движении. В относительном движении колебания упругого объекта описываются уравнением:

$$\ddot{x} + k^2 x = -U(t), \tag{2}$$

решение которого при нулевых начальных условиях:

$$x(t) = \frac{6L}{k^2 T^2} \left( \cos kt - \frac{1}{kT} \sin kt - (T - 2t) \right).$$

Скорость  $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ , ускорение  $a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$ .

Моментные соотношения ( $x(T) = 0, \dot{x}(T) = 0$ ) записаны для случая  $k = \pi \text{ с}^{-1}$ :

$$2 \sin(\pi T) - \cos(\pi T)\pi T - \pi T = 0, \quad 2 \cos(\pi T) + \sin(\pi T)\pi T - 2 = 0.$$

Один из общих корней, отличный от нуля, системы трансцендентных уравнений найден графически в интервале  $2,86060 > T > 2,86058$ . Графики поиска корня приведены на рисунке 1.

Графики переносного и относительного движения для  $T = 2,8606 \text{ с}, L = 1 \text{ м}$ , изображенные на рисунках 2, 3, свидетельствуют, что после перемещения на расстояние  $L$  наступает абсолютный покой. Графики абсолютного движения изображены на рисунке 4.

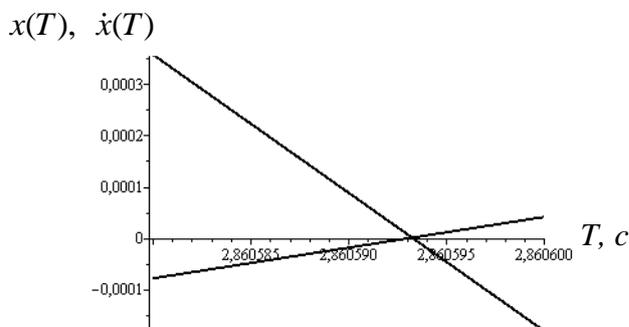


Рисунок 1. Графическое решение системы трансцендентных уравнений

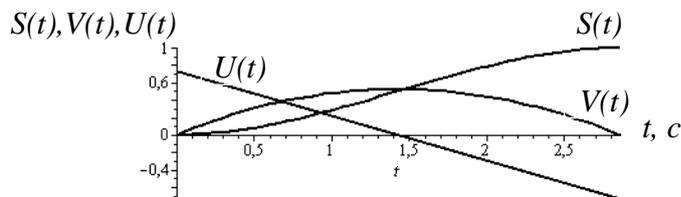


Рисунок 2. Управление в виде полинома (переносное движение)

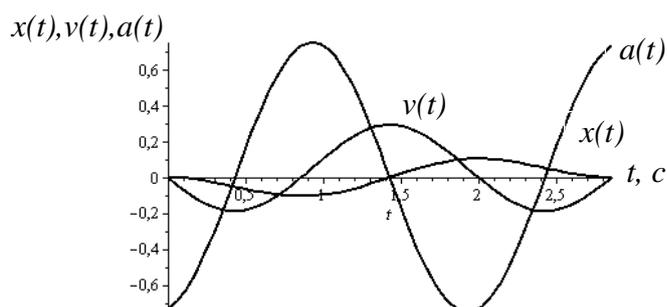


Рисунок 3. Колебания упругой системы (относительное движение)

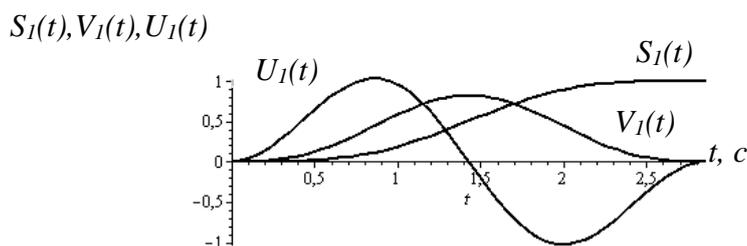


Рисунок 4. Абсолютное движение (переносное и относительное движения)

Действие (по Лагранжу)  $J_1 = \int_0^T V^2 dt = 0,4195$ ; а относительном движении  $J_2 = \int_0^T \dot{x}^2 dt = 0,0779$ , т.е.  $J_1/J_2 = 5,3843$ .

**Пример 2**

Как было показано в работе [9], переносное управление (ускорение) возможно в наиболее простом виде:

$$U(t) = \frac{Lp^2}{2\pi} \sin(pt), \tag{3}$$

где  $L$  – расстояние, на которое перемещается объект за время  $T = 2\pi/p$ ,  $p = \text{const}$ .

Частота  $p$  выбирается в зависимости от частоты  $k$  собственных колебаний упругого объекта:  $p = k/n$ ;  $n = 2,3,4,\dots$ . В общем случае управление – функция в нечетной степени, т.е.

$$U(t) = \frac{2\pi L}{T^2} \sin^{2n_1-1} \left( \frac{k}{n} t \right),$$

где  $n_1 = 1,2,3,4,\dots$ . Простой случай – при  $n_1 = 1$ ,  $p = 2\pi/T$ .

При использовании переносного ускорения период собственных колебаний и общее время движения зависимы. Особенности динамического поведения упругого осциллятора иллюстрируются на примере.

Переносное ускорение (управление) при  $m = 1$  кг далее принимается в виде:

$$U(t) = a \sin(pt), \tag{4}$$

где  $a = \text{const}$ ;  $p = 2\pi/T$ ;  $T$  – общее время движения. С учетом краевых условий:

$$S(0) = 0, \quad S(T) = L, \quad \dot{S}(T) = V(T) = 0,$$

где  $L$  – перемещение за время  $t = T$ , получено (рисунок 5):

$$U(t) = \frac{2\pi L}{T^2} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \quad V(t) = \frac{L}{T} - \frac{L}{T} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \quad S(t) = \frac{Lt}{T} - \frac{L}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right). \tag{5}$$

Дифференциальное уравнение, описывающее колебания упругого осциллятора в относительном движении без учета сопротивления, имеет вид (1). С учетом начальных условий  $x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$  (движение из состояния относительного покоя) перемещение

$$x(t) = \frac{2\pi L}{T^2 k^2 - 4\pi^2} \left( \frac{2\pi}{Tk} \sin(kt) - \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right), \quad v(t) = \frac{dx(t)}{dt}, \quad a(t) = \frac{dv(t)}{dt}. \tag{6}$$

Определение общего времени движения  $T$  иллюстрируется на примере при  $k = \pi \text{ с}^{-1}$  и периодом собственных колебаний  $T_l = 2\pi/k = 2 \text{ с}$ ;  $L = 1 \text{ м}$ .

При  $t = T$  для системы трансцендентных уравнений ( $x(T) = 0, \dot{x}(T) = 0$ ) общий корень  $T = 4 \text{ с}$ . Графики переносного движения  $S(t), V(t), U(t)$  изображены на рисунке 5, а относительного движения  $x(t), v(t), a(t)$  – на рисунке 6. Из графиков следует, что в момент времени  $t = T$  достигается абсолютный покой.

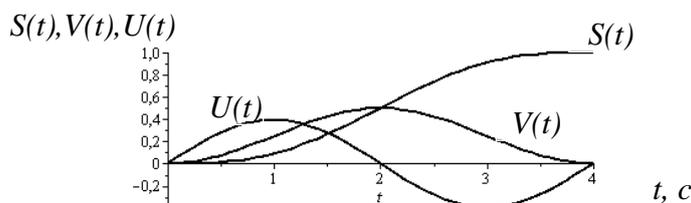


Рисунок 5. Синусоидальное управление (переносное движение)

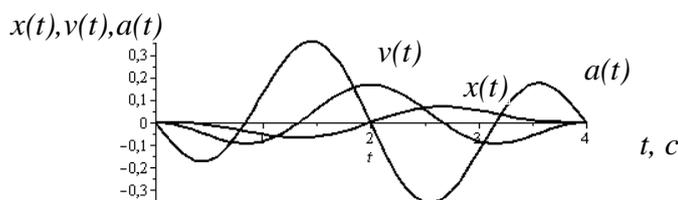


Рисунок 6. Относительное движение (колебания объекта)

В абсолютном движении (по отношению к неподвижной системе координат) графики функций  $\ddot{x}(t) = U(t) - a(t), \dot{x}(t) = V(t) - \dot{x}(t), x(t) = S(t) - x(t)$  изображены на

рисунке 7. Для сравнения переносного и относительного движений вычислены действия (по Лагранжу):  $J_1 = \int_0^T V^2 dt = 0,375$ ,  $J_2 = \int_0^T \dot{x}^2 dt = 0,0277$ , т.е. действие переносного движения в 13,5 раз больше действия относительного движения.

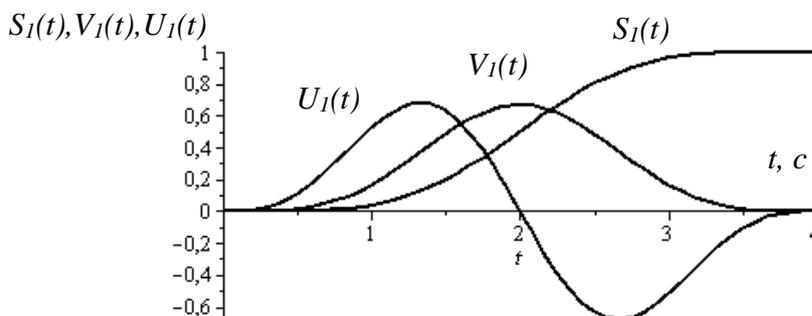


Рисунок 7. Абсолютное движение (по отношению к неподвижной системе координат)

Эксперименты и обобщения результатов реверсионного конструирования (с использованием Maple) привели к универсальным аналитическим зависимостям для перемещения, скорости и ускорения для полинома ускорения (управления) степени  $n$ :

$$S(t) = \frac{L}{2T(n+2)} \left( T^{-n-1} (T-2t)^{n+2} + 2nt + 4t - T \right), \tag{7}$$

$$V(t) = \frac{dS(t)}{dt}, \quad U(t) = \frac{dV(t)}{dt} = \frac{2L(n+2)}{T^{n+2}} (T-2t)^n,$$

где  $n$  – нечетная степень полинома ( $n = 1,3,5,7\dots$ ). Если  $n = 1$ , то из (2) ускорение  $U(t) = \frac{6L(T-2t)}{T^3}$ , что соответствует классическому управлению, полученному вариационным методом (при использовании критерия оптимальности  $\int_0^T U^2 dt$ ).

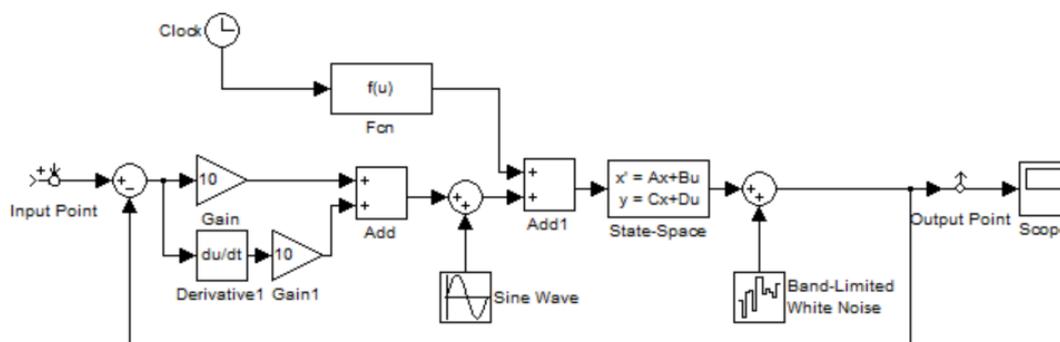


Рисунок 8. Графическая модель комбинированного управления (вариант 1)

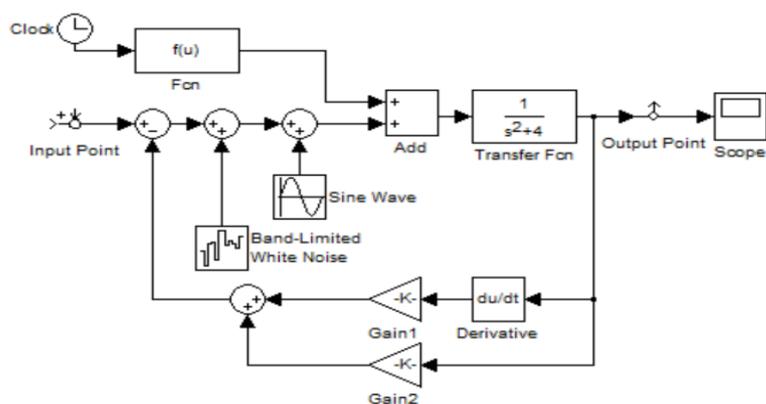


Рисунок 9. Графическая модель комбинированного управления (вариант 2)

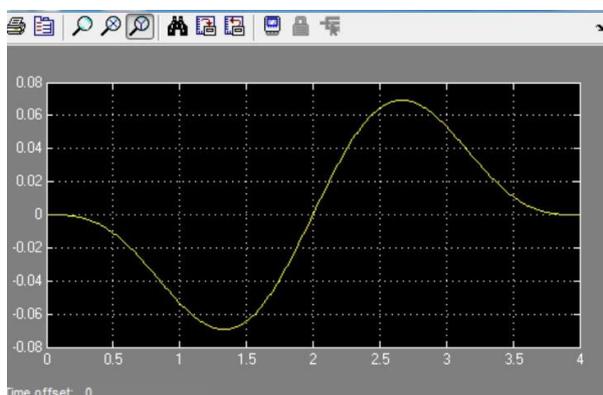


Рисунок 10. Относительное движение (колебания без учета сопротивления)

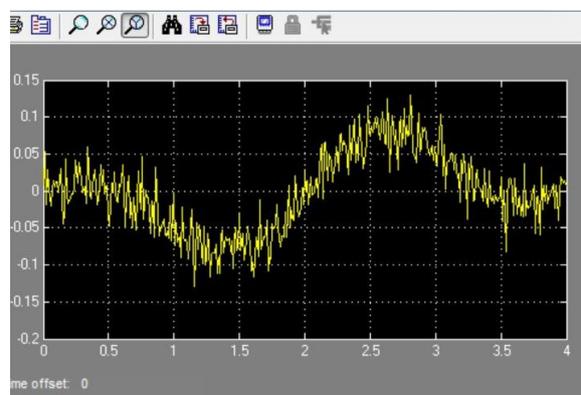


Рисунок 11. Относительное движение (колебания с учетом помех)

На рисунках 8 – 11 изображены модели комбинированного управления (оптимального программного поступательного с учетом обратной связи) и графики колебаний упругой системы в относительном движении. Использование обратной связи приводит к снижению уровня случайных колебаний на временном интервале оптимального движения.

**Заключение**

Оба типа управления позволяют в фиксированный момент времени, определяемый как один из общих корней моментных соотношений, достичь абсолютного либо относительного покоя упругого объекта.

Первый тип управления «разгон-торможение», основанный на использовании полиномов ускорения (или перемещения) позволяет не только достичь состояния относительного либо абсолютного покоя, но и существенно сэкономить энергию для достижения поставленной цели движения.

Оба типа конструируемых таким образом управлений могут применяться только для разгона или только для торможения с достижением состояния абсолютного либо относительного покоя.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе. – М.: Наука, 1983. – 391 с.
2. Красовский Н. Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
3. Теория автоматического управления. Ч. II. Теория нелинейных специальных систем автоматического управления / Под ред. А. А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1997. – 288 с.
4. Черноусько, Ф. Л. Управление колебаниями / Ф. Л. Черноусько, П. Д. Акуленко, Б. Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
5. Гуляев В. И. Оптимальное управление движением механических систем / В. И. Гуляев, В. А. Баженов, В. П. Кошкин. – К.: УМК ВО, 1988. – 235 с.
6. Троицкий, В. А, Оптимальные процессы колебаний механических систем / В. А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
7. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П. Д. Крутько. – М.: Наука, 1988. – 326 с.
8. Бохонский, А. И. Управление переносным движением упругих систем / А. И. Бохонский // Динамические системы. – Симферополь: КФТ, 2004. – Вып. 18. – С. 56 – 63.
9. Бохонский, А. И. Оптимальное переносное движение упругих объектов / А. И. Бохонский, Н. И. Варминская // Динамические системы. – Симферополь: ТНУ, 2005. – Вып. 19. – С. 3 – 10.
10. Бохонский, А. И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А. И. Бохонский, Н. И. Варминская, М. И. Мозолевский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.
11. Бохонский, А. И., Варминская Н. И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике: монография / А. И. Бохонский, Н. И. Варминская. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.
12. Бохонский, А. И. Реверсионный принцип оптимальности / А. И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
13. Бохонский, А. И., Варминская Н. И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А. И. Бохонский, Н. И. Варминская. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
14. Бохонский, А. И. Механика управляемого движения объектов / А. И. Бохонский, Н. И. Варминская, Т. В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021.–170 с.
15. Bokhonsky, A. I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. I. Bokhonsky, S. Y. Zolkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.

Поступила в редколлегию 02.02.2024 г.

УДК 621.822.174; 681.7.054.43

**В. Е. Брешев**, д-р техн. наук, проф., **Ю. С. Долженко**  
(ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, ЛНР, Россия)

Тел./Факс: +79591596616, E-mail: [veb\\_lug@mail.ru](mailto:veb_lug@mail.ru)

## **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШПИНДЕЛЯ НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКАХ**

*Представлена разработанная методика и результаты вычислительных компьютерных экспериментов по исследованию динамической устойчивости высокоскоростного шпинделя станка шлифования. Вычислительными компьютерными экспериментами исследована устойчивость ротора шпинделя при действии динамических нагрузок через численное определение амплитуд поперечных колебаний во всём диапазоне частот вращения, включая резонансные области. Определены параметры и режимы функционирования шпинделя, при которых сохраняется его динамическая устойчивость и работоспособность.*

**Ключевые слова:** газостатические подшипники, динамическая устойчивость, шпиндель, критические частоты вращения.

**V. E. Breshev, Y. S. Dolzhenko**

## **COMPUTATIONAL EXPERIMENTS TO STUDY DYNAMIC STABILITY OF HIGH-SPEED SPINDLE ON GAS-STATIC BEARINGS**

*The developed methodology and results of computational experiments to study the dynamic stability of a high-speed spindle of a grinding machine are presented. Computational computer experiments have been used to study the stability of the spindle rotor under the action of dynamic loads through the numerical determination of the amplitudes of transverse vibrations over the entire range of rotational speeds, including resonant regions. The parameters and operating modes of the spindle are determined, under which its dynamic stability and performance are maintained.*

**Keywords:** gas-static bearings, dynamic stability, spindle, critical rotational speeds.

### **1. Введение**

Для обеспечения надёжной работы шпинделей на газостатических подшипниках, выполняющих прецизионную механическую обработку на высокоскоростных режимах, является принципиально важным исследование их динамической устойчивости. Полученные результаты динамического анализа позволяют при разработке шпинделей определить конструктивные, технологические, эксплуатационные требования и условия их динамической устойчивости при функционировании.

Применение газостатических подшипников в шпинделях станков шлифования позволяет сделать технологическое оборудование для механической обработки высокоскоростным, наиболее ресурсо- и энергосберегающим. В отличие от подшипников качения, в газостатических подшипниках газовая смазка полностью исключает твердотельный контакт между опорными поверхностями при вращении. Движение без контакта и трения между опорными поверхностями подшипников с газовой смазкой исключает их износ, приводит к уменьшению тепловыделения, снижению энергопотребления и увеличению срока службы шпинделя. Если прецизионные шпиндели на высокоскоростных шарикоподшипниках сохраняют параметры точности механической обработки в течение 10-12 тыс. часов работы, то наработка газостатических подшипников с сохранением нормативной точности обработки не ограничена в течение всего периода эксплуатации шпинделя и станка. Кроме того, газостатические опорные системы не

нуждаются в принудительном охлаждении и дополнительном времени холостого вращения для выхода на рабочий температурный режим [1, 2, 3].

Перечисленные преимущества, наряду с возможностями достижения высоких уровней жёсткости, создают необходимые условия для эффективного применения газостатических подшипников при высокоскоростной обработке (ВСО) металлов и монокристаллов. Она обеспечивает значительный рост производительности и качества обработки, но ведётся на частотах вращения от 10000 об/мин до 150000 об/мин с точной установкой скоростных режимов [4]. Использование же шарикоподшипниковых опор на частотах вращения свыше 60000 об/мин является энергозатратным и технически проблематичным, так как они на высоких частотах имеют в 10...15 раз большие потери на трение и требуют интенсивного принудительного охлаждения масляным туманом, на которое уходит до 25 % энергопотребления шпинделей.

## 2. Актуальность исследований и постановка задачи

При всех перечисленных преимуществах газостатических подшипников, их «слабым местом» является динамическая устойчивость. Возникновение колебаний при малой величине зазора с газовой смазкой может привести к касанию опорных поверхностей и нарушению работоспособности подшипников и шпинделя. Причинами таких колебаний могут быть внешние технологические силы, неуравновешенность ротора, овальность (неровность) цилиндрических поверхностей подшипников, приводящая к пульсациям давления при вращении и др.

Особую опасность несут в себе поперечные колебания на резонансных частотах вращения, которые, как известно, вызваны совпадением собственных частот колебаний с частотами внешних возмущающих сил и сопровождаются резким ростом амплитуд колебаний ротора (вала) шпинделя [5].

Если против угловых колебаний ротора шпинделя «работает» несущая способность подпятника и радиальных опор, то поперечные колебания воспринимаются только радиальными опорами, поэтому данный тип колебаний является наиболее опасным для динамической устойчивости шпинделя.

Очевидно, что на резонансных частотах вращения высокоскоростной шпиндель функционировать не может, но он должен проходить их при разгоне, так как рабочие частоты вращения при ВСО часто находятся в областях закритических скоростей вращения. Поэтому исследование динамической устойчивости шпинделя при разгоне, прохождении резонансных областей частот вращения и работе на высокоскоростных режимах является актуальным и необходимым.

Для оценки динамической устойчивости необходимо в процессе исследований определить амплитуды поперечных колебаний ротора на различных режимах вращения и при действии возмущающих сил, моделируя разгон ротора и прохождение резонансных областей. Затем, в каждом расчётном случае, нужно сопоставить рассчитанные амплитуды поперечных колебаний ротора со значениями допустимого относительного радиального смещения опорных поверхностей его газостатических подшипников.

Для динамической устойчивости ротора допустимый остаточный радиальный зазор с газовой (воздушной) смазкой в его газостатических подшипниках при колебаниях должен составлять 2...4 мкм. Следовательно, при любом режиме вращения, амплитуды поперечных колебаний ротора шпинделя должны быть меньше среднего зазора в его радиальных опорах (он равен 15 мкм) на величину допустимого остаточного зазора [6, 7].

Целями исследований являются:

- разработка методики исследования динамической устойчивости высокоскоростного шпинделя с ротором на газостатических подшипниках;
- определение критических частот вращения ротора;
- исследование вынужденных поперечных колебаний и динамической устойчивости ротора шпинделя на различных скоростных режимах и в условиях возникновения резонанса;
- определение условий динамической устойчивости ротора шпинделя.

### 3. Методика исследований

Для исследования динамической устойчивости вала шпинделя была разработана методика, которая состоит в последовательном решении следующих задач:

- выполнении предварительного расчёта статических характеристик газостатических подшипников – жёсткости и несущей способности – в соответствии с требованиями технического задания и разработанной конструкцией опорной системы шпинделя [7];
- разработке 3D-модели шпинделя на газостатических опорах;
- разработке динамической модели ротора (вала) шпинделя в САЕ программе с установкой виртуальных опор с рассчитанными для них жёсткостями;
- выполнении на основе динамической модели расчётов собственных частот колебаний ротора на газостатических опорах в программах САПР, что позволяет определить наиболее опасные резонансные области функционирования шпинделя, когда собственные частоты совпадают с частотами вынужденных колебаний (возникающих от действия внешних сил резания, сил дисбаланса вала и др.);
- моделировании введением тарированной неуравновешенности внешних динамических нагрузок в виде переменных сил, зависящих от частоты вращения и вызывающих поперечные колебания ротора при вращении на различных скоростных режимах;
- выполнении вычислительных компьютерных экспериментов по виртуальному разгону и вращению ротора при действии динамических нагрузок с определением величин амплитуд поперечных колебаний на установившихся и переходных режимах вращения, включая попадание в наиболее опасные – резонансные области [6, 7];
- определении условий, при которых сохраняется динамическая устойчивость ротора и работоспособность шпинделя.

Ввиду сложности физических процессов, происходящих при колебаниях вращающегося ротора на газостатических подшипниках, задачи определения собственных частот колебаний и расчёт интегральных характеристик опор решаются двумя независимыми методами и в различных программах САПР. Дублирующие расчёты, например, собственных частот колебаний, позволяют минимизировать влияние случайных и системных ошибок в результатах исследований.

### 4. Результаты исследований

Для разработанной конструкции шпинделя были предварительно рассчитаны двумя методами характеристики газостатических опор [7], которые определяющим образом влияют на статическую и динамическую устойчивость шпинделя. Рассчитанная жёсткость каждой из опор затем использовалась при создании динамической модели.

С целью выполнения компьютерных вычислительных экспериментов в среде САПР разработана 3D-модель шпинделя на газостатических подшипниках (рисунок. 1).



Рисунок 1. Трёхмерная модель шпинделя

3D-модель шпинделя включает в себя модель опорной газостатической системы, которая состоит из двойного (двухстороннего) подпятника и двух одинаковых по конструкции радиальных газостатических подшипников (рисунок. 2).

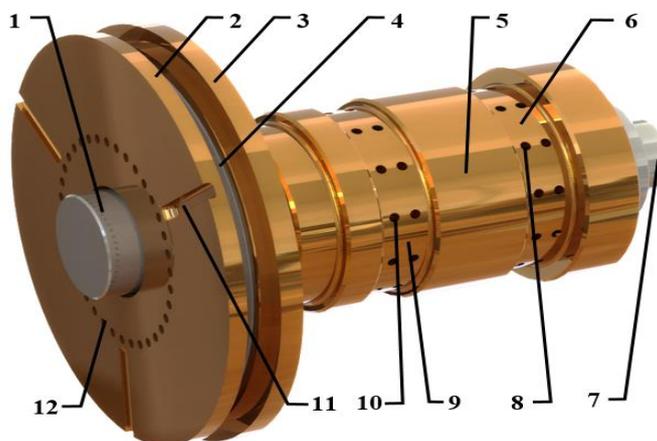


Рисунок 2. Газостатическая опорная система шпинделя

На рисунке 2 показаны: 1 – вал (ротор) шпинделя; 2 – левый подпятник с системой каналов и питателей; 3 – правый подпятник с системой каналов и питателей; 4 – пята вала; 5 – подшипниковый блок радиальных газостатических опор; 6 – правый радиальный подшипник; 7 – хвостовая часть вала, идущая к электродвигателю; 8 – ограничители расхода воздушной смазки (питатели) правого подшипника; 9 – левый радиальный подшипник; 10 – питатели левого радиального подшипника; 11 – каналы подвода воздушной смазки к питателям левого подпятника; 12 – питатели левого подпятника.

3D-модель ротора шпинделя была экспортирована в программу инженерного анализа, в которой построена конечно-элементная сетка и симитированы опоры расчётной жёсткости. Затем вычислительными экспериментами МКЭ в САЕ программе были определены собственные частоты колебаний ротора на расчётных опорах (рисунок. 3).

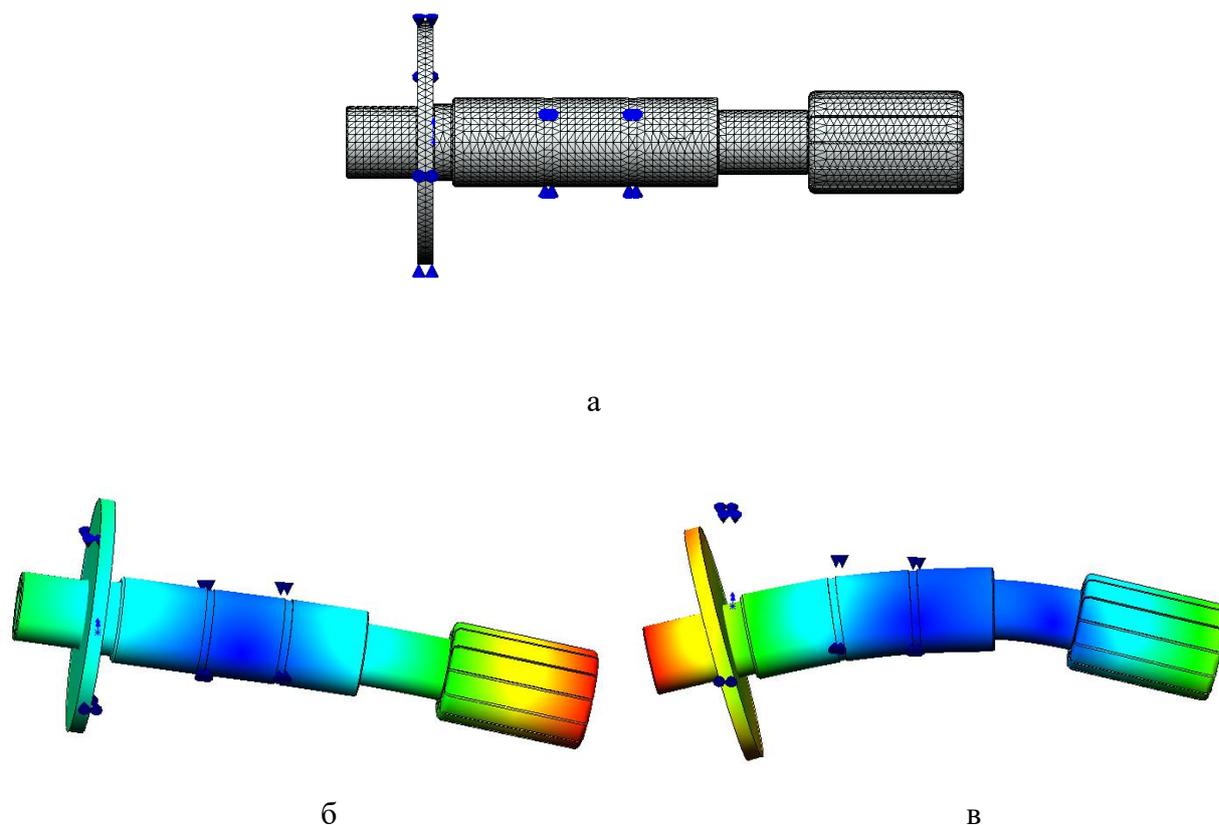


Рисунок 3. Расчётная сетка (а) и формы колебаний ротора 2 и 3 (б), 4 и 5 гармоник (в)

Получены значения 5 гармоник собственных частот колебаний: 0,0188 Гц, 99,259 Гц, 99,26 Гц, 435,3 Гц, 435,31 Гц. Наиболее часто внешняя возмущающая сила кратна частоте вращения ротора, поэтому полученные значения показывают, что явление резонанса на первой частоте маловероятно (кратны частоте вращения 1,18 об/мин). На 2 и 3 гармониках резонанс может возникнуть при частоте вращения 5955,6 об/мин или кратно ей. На 4 и 5 гармониках резонанс может возникнуть при частоте вращения 26118 об/мин или кратно ей. Наибольшую опасность представляют 2 и 3 гармоники, так как их резонансная частота входит в диапазон рабочих частот вращения ротора шпинделя (до 25000 об/мин) и он будет её проходить при выходе на высокоскоростные режимы функционирования.

Результаты расчётов собственных частот колебаний и определение критических скоростей вращения наглядно демонстрируются с помощью диаграммы Кэмпбелла (частотной диаграммы), рассчитанной в другой САЕ программе на основе 3D-модели ротора шпинделя. Диаграмма Кэмпбелла показывает критические скорости вращения ротора в точках пересечения, которые с высокой точностью совпали с 2, 3 и 4, 5 гармониками, определёнными методом конечных элементов (см. рисунок. 3 б, в). Частотная диаграмма ротора шпинделя на газостатических подшипниках при внешней возмущающей силе, частота которой совпадает с частотой вращения, показана на рисунке 4.

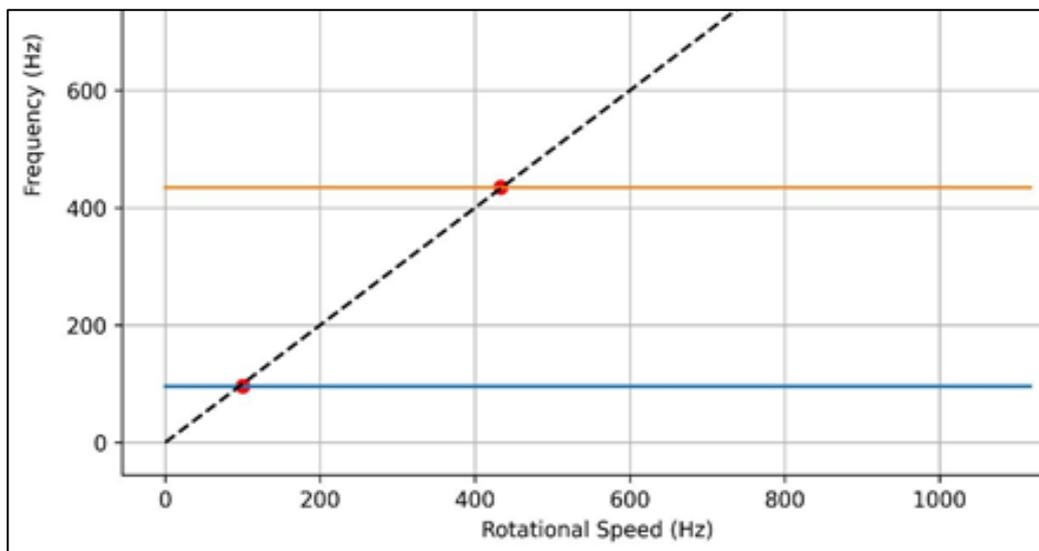


Рисунок 4. Частотная диаграмма ротора шпинделя

Для имитации переменной динамической нагрузки в 3D-модель ротора нами был введён искусственный тарированный дисбаланс. Он позволяет задать заранее известные внешние возмущающие силы и даёт возможность их изменять в ходе исследований.

Искусственный дисбаланс при вращении приведёт к возникновению неуравновешенных сил инерции (центробежных сил), вызывающих близкие к гармоническим поперечные колебания центра масс ротора шпинделя с частотой, равной частоте вращения и с амплитудами колебаний в плоскости  $XOY$ , перпендикулярной оси вращения.

Для проведения вычислительных экспериментов вырезом цилиндрического элемента в торцевой части 3D-модели ротора, со стороны электродвигателя, был установлен искусственный тарированный дисбаланс, который равен по величине 30 г·мм (рисунок. 5).

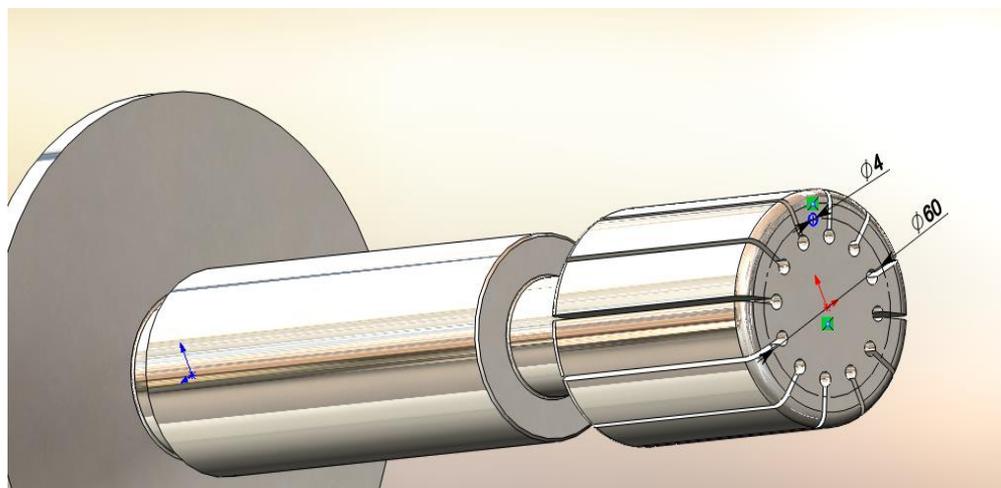


Рисунок 5. Эскиз выреза элемента для создания тарированного дисбаланса на валу

В соответствии с положениями теоретической механики центробежные силы и амплитуды поперечных колебаний пропорциональны квадрату угловой скорости вращения, что подтверждает компьютерный вычислительный эксперимент в САЕ программе для установившихся режимов вращения ротора (рисунок. 6).

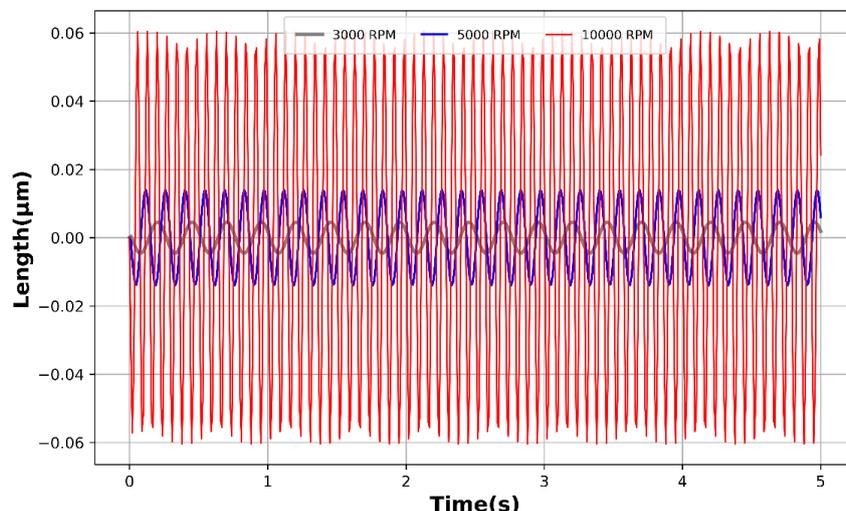


Рисунок 6. Амплитуды поперечных колебаний неуравновешенного ротора шпинделя при установившемся движении на частотах вращения 3, 5 и 10 тыс. об/мин

Результаты вычислительных экспериментов показали, что при частотах вращения до 10000 об/мин амплитуды колебаний, вызванные неуравновешенностью (дисбалансом) не превышают 0,06 мкм, что вполне приемлемо для выполнения шпинделем высокоточной механической обработки, например, шлифования или полирования.

Однако, частота вращения ротора 10000 об/мин является так называемой критической, потому что для её достижения необходимо пройти критическую область резонанса, которая возникает при частоте вращения 5955,6 об/мин.

Сначала компьютерным вычислительным экспериментом исследуем относительно медленный разгон ротора шпинделя, который характерен для приводов, разгоняющихся под технологической нагрузкой и с не большим запасом мощности двигателя. Разгон от 4170 об/мин до 9000 об/мин за 10 с и прохождение критической (резонансной) области частот показано на рисунке. 7.

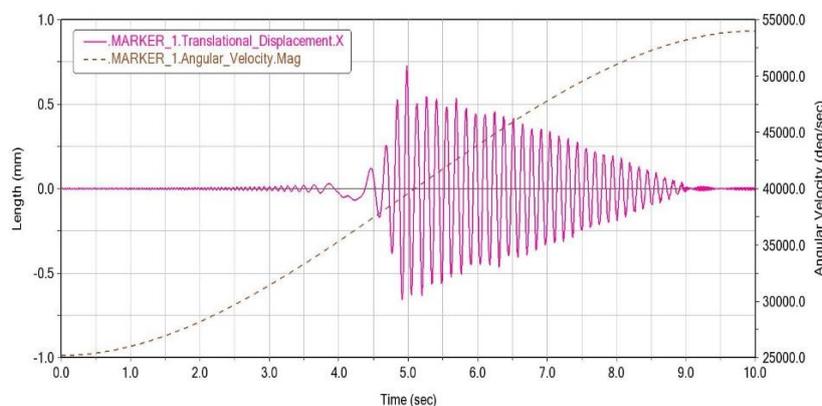


Рисунок 7. Медленный разгон вала и прохождение резонансной частоты

На рисунке 7 отчётливо виден резкий рост амплитуд поперечных колебаний вала при вхождении в область резонанса (2 и 3 гармоник) и более затяжной выход из неё в процессе последующего продолжения медленного разгона, близкого к равномерному.

При резонансе амплитуда поперечных вынужденных колебаний центра масс ротора резко возрастает и достигает величины 0,75 мм (750 мкм), что недопустимо с точки зрения функционирования газостатических подшипников шпинделя, так как их средний зазор равен 15 мкм. В данном случае колебания приведут к ударному контакту опорных поверхностей газостатических подшипников, их повреждению и нарушению работоспособности шпинделя. Таким образом, достичь ротором с дисбалансом 30 г·мм частоты вращения 10000 об/мин при медленном разгоне не представляется возможным.

Исследуем в компьютерном эксперименте движение центра масс ротора шпинделя в плоскости  $XOY$ , так называемое орбитальное движение. Для наглядности и получения пространственной картины амплитуд поперечных колебаний, определим траектории в достаточно малых интервалах времени вокруг его характерных значений – 3, 6, 7, 8 секундах медленного разгона (см. рис. 7), при которых амплитуды претерпевают существенные изменения.

Орбитальное движение показывает примерную симметричность амплитуд вынужденных колебаний относительно оси вращения, отсутствие дополнительных гармоник в поперечных колебаниях ротора шпинделя (см. рисунок 8.).

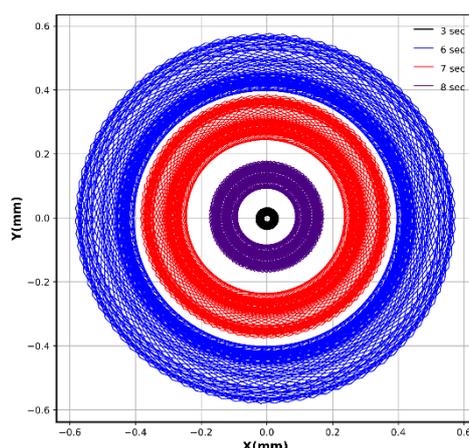


Рисунок 8. Орбитальное движение вала около 3, 6, 7, 8 секунд разгона

Таким образом, при необходимости выхода на закритические частоты вращения, например, при использовании данного шпинделя для высокоскоростной механообработки, необходимо принять дополнительные меры для сохранения его динамической устойчивости. Для этого рассмотрим применение следующих технических решений:

- уменьшение неуравновешенности ротора или величин внешних возмущающих сил;
- повышение интенсивности разгона ротора.

При этом уменьшение допустимого уровня неуравновешенности ротора шпинделя или величин внешних возмущающих сил является наиболее простым и эффективным решением, которое технически реализуемо и может быть исследовано аналогичным образом.

Подробно исследуем второй путь повышения устойчивости при прохождении критической области – осуществление более интенсивного разгона ротора без техноло-

гической нагрузки. Для этого в вычислительном эксперименте при приближении к резонансной области увеличим угловое ускорение с целью её «проскочить», не допустив критического роста значений амплитуд поперечных колебаний.

На рисунке 9. показан разгон ротора при прохождении резонансной области, интенсивность которого увеличена до углового ускорения 25000 об/мин за секунду разгона, или в системе СИ  $\varepsilon = 2618 \text{ рад/с}^2$ .

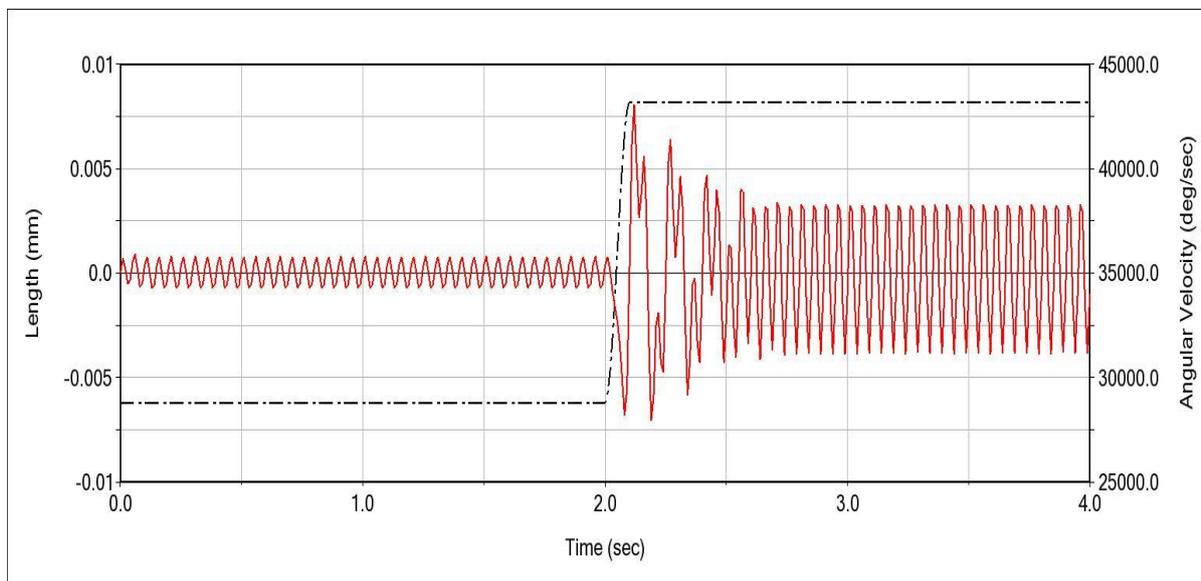


Рисунок 9. Прохождение резонансной области поперечных колебаний при повышении интенсивности разгона ротора до ускорения  $2618 \text{ рад/с}^2$

Увеличение углового ускорения в 50 раз, в сравнении с разгоном, показанным на рисунке 7., привело к многократному снижению амплитуд колебаний в области резонанса. Расчёт в САЕ программе динамического анализа показал, что при разгоне с угловым ускорением  $2618 \text{ рад/с}^2$  максимальные амплитуды вынужденных поперечных колебаний центра масс ротора снижаются до 7...8 мкм. Ротор на газостатических подшипниках со средним зазором 15 мкм в данном случае сможет пройти критическую область колебаний, соответствующую 2 и 3 гармоникам, без нарушения работоспособности газостатических подшипников и всего шпинделя.

Расчёты также показали, что введённая искусственная неуравновешенность 30 г·мм близка по величине к максимальной допустимой остаточной неуравновешенности ротора при изготовлении шпинделя. Она многократно превосходит минимальную неуравновешенность (0,1 г·мм), которая в настоящее время может быть достигнута балансировкой при изготовлении данного шпинделя.

### Заключение.

Таким образом, в ходе исследований была разработана и апробирована методика исследования динамической устойчивости ротора на газостатических подшипниках шпинделя станка шлифования с учётом прохождения критических (резонансных) частот вращения при разгоне.

Вычислительными компьютерными экспериментами исследована динамическая устойчивость шпинделя с определением величин амплитуд вынужденных поперечных

колебаний ротора на установившихся и переходных режимах вращения, включая наиболее опасные резонансные области.

Предложены и исследованы технические решения и условия обеспечения динамической устойчивости шпинделя, приводящие к ограничению роста амплитуд поперечных вынужденных колебаний его ротора при разгоне и прохождении критических (резонансных) частот вращения.

Полученные результаты позволяют при разработке и эксплуатации шпинделя шлифовального станка обеспечить динамическую устойчивость его ротора на газостатических подшипниках для эффективной реализации высокоскоростной механической обработки материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Брешев, В. Е. Анализ технических преимуществ применения аэростатических опор в шпинделях технологических машин / В. Е. Брешев // Вестник ЛГУ им. В. Даля. – Луганск: Изд-во ЛГУ, 2023. – № 7(73) – С. 141–145.
2. Сипенков, И. Е. Прецизионные газовые подшипники / И. Е. Сипенков [и др.]. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ Электроприбор, 2007. – 504 с.
3. Brian Rowe, W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design / W. Brian Rowe. – Oxford, 2012 – 334 с.
4. Преимущества и недостатки высокоскоростной обработки: [сайт StankoffRu]. – М, 2023 – URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/981> (дата обращения: 03.05.2024).
5. Бабаков, И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. – 4-е изд. – М.: Дрофа, 2004. – 591 с. – (Классики отечественной науки).
6. Брешев, В. Е. Вычислительные эксперименты по исследованию характеристик пневмошпинделя на регулируемых конических аэростатических опорах / В. Е. Брешев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сб. науч. тр. XXX Международной научно-технической конференции Машиностроение и техносфера XXI века, г. Севастополь, 11-17 сентября 2023 г. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2023. – Вып. 3(82) – С. 9–18.
7. Брешев, В. Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: монография / В. Е. Брешев. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. – 208 с.

Поступила в редколлегию 06.02.2024 г.

УДК 669:539.4.01

**В. А. Ермишкин**, д-р техн. наук, проф., **Н. А. Минина**, **Н. А. Палий**  
(ИМЕТ РАН, Москва, Россия)

Тел./факс: +7(499)1359668/+7(499) 1358680; [eva@imet.ac.ru](mailto:eva@imet.ac.ru); [minina1951@rambler.ru](mailto:minina1951@rambler.ru)

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТ ПАРАМЕТРА СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

*Целью настоящей работы является проверка возможности аналитического описания механических свойств металлов и сплавов с параметрами их структурного состояния, определенных по данным измерений с помощью фотометрического анализа их структурных изображений (ФАСИ), разработанного ранее в ИМЕТ РАН.*

*Ключевые слова:* механические свойства материалов, структурное состояние, деформация, фотометрический анализ.

**V. A. Yermyskin, N. A. Minina, N. A. Paliy**

## ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE DEPENDENCE OF MECHANICAL PROPERTIES ON THE STRUCTURAL STATE PARAMETER OF METAL ALLOYS

*The purpose of this work is to test the possibility of an analytical description of the mechanical properties of metals and alloys with the parameters of their structural state, determined from measurement data using photometric analysis of their structural images (PHASI), previously developed at IMET RAS.*

*Keywords:* mechanical properties of materials, structural state, photometric analysis, deformation.

### 1. Введение

Существующие методы расчетов на прочность металлических конструкций базируются на представлениях о сплошном строении бесструктурных материалов и на аналитическом описании механических характеристик, определяемых экспериментально по замерам размеров элементов конструкций и их формоизменения в процессе деформирования [1-3]. Они не учитывают современных результатов физического материаловедения о зависимости механических свойств от структурных параметров, описывающих их зависимость от атомно-кристаллического строения материалов, включая дефекты кристаллических решеток [4-10].

### 2. Исследуемые материалы и методы исследования

Основные предпосылки решения поставленной задачи были проверены в результате экспериментального исследования плоских образцов из монокристаллов, ориентированных в направлении [110], полученных методом электронно-лучевой зонной плавки. Из них с помощью электроискровой резки были получены заготовки образцов, которые прокаткой с последующим шлифованием были доведены до толщины 0,5 мм. Из заготовок были вырезаны образцы с длиной рабочей части 10 мм. на рабочую поверхность, которых были выведены плоскости с нормалью, ориентированной в направлении [001]. После отжига при  $T = 800^{\circ}\text{C}$  в течении 30 мин. образцы испытывались растяжением в захватах универсальной испытательной машины Инстрон-3382 со скоростью  $\dot{\epsilon} = 2,78 \cdot 10^{-5} \text{ 1/с}$ . Образцы деформировались в результате скольжения по системам  $\{110\} \langle 111 \rangle$  и разрушались по дислокационно-сдвиговому механизму, установленному ранее. Образцы испытывались методом *in situ*, при котором наряду с непрерывной записью результатов испытания с помощью видеокамеры синхронно записывались результаты наблюдения за структурной эволюцией материала на поверхности об-

разцов. Результаты испытаний были проанализированы покадрово с помощью ФАСИ. Типичная картина такого анализа приведена на рис. 1. На нем в верхней части показаны слева - изображение эталонного фрагмента, роль которого выполняет изображение фрагмента образца до начала его деформирования, справа - размещаются изображения фрагментов из последовательности кадров, выбранных для анализа с помощью ФАСИ. В нижней части рис. 1 показаны спектры яркости отражения видимого света, отраженного от поверхности соответствующих фрагментов исследуемых образцов, которые строятся в координатах «интенсивность - спектральная плотность  $\{p(\Delta I)\}$  в выделенных цветом интервалах – спектра - средняя интенсивность отражения в этих интервалах -  $\Delta I$ ». В ФАСИ предусмотрена возможность выделения различными цветами интервалов, имеющих особенности отражения. В этих интервалах спектральная плотность измеряется по формуле (1):

$$p(I) = \frac{n_i}{N} \tag{1}$$

где:  $n_i$  - количество пикселей окрашенных в определенный цвет ( $i$ ),  $N$  - общее количество пикселей, на которое разбито все изображение фрагмента. Средняя интенсивность отражения видимого света от поверхности образца ( $I$ ) оценивается по формуле (2):

$$I = \frac{\sum_1^n \Delta I_i}{n} \tag{2}$$

где:  $\Delta I_i$  – интервалы разбиения оси абсцисс,  $n$  - количество интервалов разбиения. Интенсивность отражения изменяется в линейной шкале, за нуль, которой принято ее состояние, когда происходит полное поглощение света, а за единицу принято состояние полного отражения света от поверхности образца.

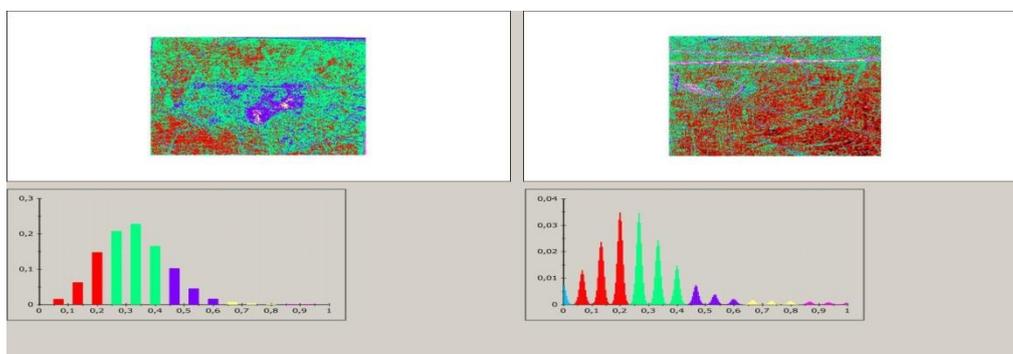


Рисунок 1. Результаты фотометрического анализа структурных изображений фрагмента образца О5 (слева - лицевая сторона (О5л), справа - задняя сторона (О5з) 5л, под структурными изображениями показаны спектры яркости отражения от их поверхности

На рисунке показаны фрагменты образца из монокристалла взятые с двух сторон после прокатки. Результатом покадрового анализа видео записи за эволюцией структуры в средней части на рабочей части образца было формирование массива изображений, составляющих временную последовательность видео фрагментов изображений поверхности в последовательные моменты времени. Из компьютерной записи результатов механических испытаний для этих же моментов времени были выбраны массивы соответствующих фрагментам массивам действующих напряжений и деформаций.

### 3. Обсуждение полученных результатов

Эксперименты по деформированию макроскопических образцов в условиях *in situ* информация о действующих напряжениях и значения соответствующих им деформаций непрерывно регистрируется в компьютере испытательной машине. Для решения поставленной задачи нужно поставить во взаимно однозначное элементам массивов  $\{\sigma_i\}$  и  $\{\varepsilon_i\}$  сопряженные с ними по времени значения структурных параметров. Роль обобщенных структурных параметров не могут выполнять известные структурные параметры таких как дефекты кристаллического строения, дисперсные выделения вторичных фаз и мелкие включения металлургического происхождения ввиду различий в их физико-химической природе. Проведенные нами исследования показали, что эту роль может выполнять поток фотонов, отраженных от поверхности исследуемых объектов. Сама их цветная окраска при освещении бесцветным видимым цветом возможна, если на ней происходит поглощение части падающего потока на них светового потока и отражение другой его части. Именно эта часть воспринимается нашими глазами как окраска поверхности объектов и ее можно рассматривать как сигнальную информацию о структурном состоянии поверхности объекта. С учетом того факта, что поглощенная часть светового потока участвует в изменении структурного состояния материала объекта при внешних энергетических воздействиях различной физико-химической природы. Эти воздействия всегда имеют проявления на поверхности исследуемого объекта. Эффект регистрации их воздействия на объект и был положен в основу создания фотометрического анализа структурных изображений. Элементарным актом отражения видимого света является взаимодействие падающих на объект фотонов с валентными электронами. Осциллирующие векторы электрического поля фотонов инициируют поверхностный ток в объекте, который в свою очередь возбуждает излучаемые фотоны электромагнитных волн. Факт излучения фотонов свободными электронами подтверждается излучением света от полированной поверхности эбонита после его электролиза его поверхности трением шерстяной тканью, что было обнаружено методом ФАСИ.

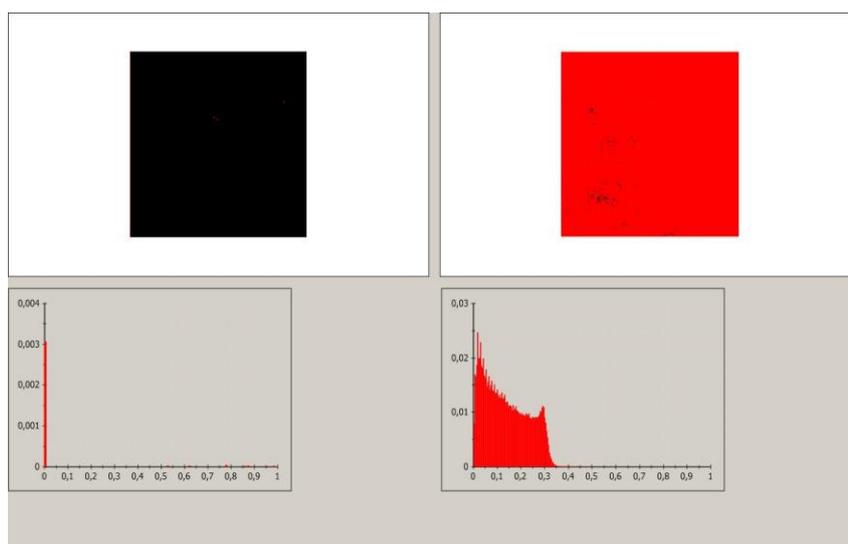


Рисунок. 2. Результат электролиза поверхности полированной поверхности эбонита. Слева – изображение фрагмент поверхности эбонита и спектр яркости отражения видимого света от него, справа – то же, но после электролиза этого фрагмента

В ФАСИ, в процессе анализа кадров видеозаписи результатов экспериментов, фактически воспроизводится ситуация, имеющая место при деформировании образцов. При этом происходит разделение светового потока на отраженную электронных и поглощенную части, которые регистрируются. Поскольку поглощение света происходит на свободных электронах концентрация которых на дефектах существенно выше, что дает возможность измерять концентрации дефектов различной природы. По этой причине в качестве обобщенного структурного фактора в аналитических описаниях физических процессов можно было попробовать использовать поглощенную долю светового потока в качестве обобщенного критерия структурного состояния материалов в аналитическом описании физических и производственных процессах. В настоящей работе этот подход был использован для описания роли структуры в оценки прочности материалов. Его развитию было положено начало исследованием деформирования образцов из монокристаллов молибдена с кристаллогеометрией [110] (001). Механические свойства таких образцов приведены в таблице №1.

Таблица 1. Механические свойства монокристаллических образцов из молибдена

№ образцов	№ испытаний	Механические свойства				Технология обработки
		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{в.}$ , МПа	$\delta$	$\Psi$	
5-1	8	376	417	0,226	0,0112	Прокатка вдоль+ТО
6-1	12	423	470	0,269	0,212	Прокатка вдоль+ТО
6-2	15	424	473	0,084	0,0216	Обработка та же, но h>мм
9-1	18	391	472	0,083	0,077	Прокатка вдоль и поперек+ТО

В таблице №1 приведены данные образцов, которые отличаются предварительной технологической подготовкой и как результат различными механизмами деформирования и характером разрушения. Тем не менее, их прочностные характеристики близки по величине, чего нельзя сказать о показателях пластичности, которые напрямую определяются этими механизмами. Традиционная ориентация на выбор режимов технологической обработки с ориентацией на точечные значения механических характеристик сплавов требует больших финансовых и трудовых затрат на многочисленные варианты обработки. Замена этого подхода на ориентацию на сочетание механических характеристик и соответствующих им структурных параметров. Использование обобщенных структурных параметров позволит сократить объем поисковых исследований.

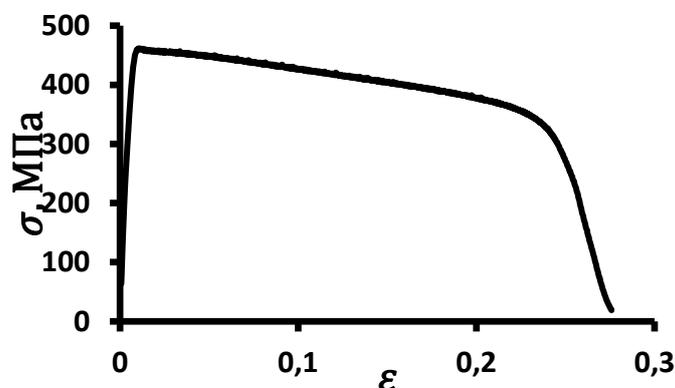


Рисунок 3. Типичная кривая растяжения монокристаллического образца из Мо (обр.6.1')

На основе вышеизложенных соображений были выбраны системы координат для построения, используя информационные массивы  $\{\sigma_i\}$ ,  $\{\varepsilon_i\}$  формируется в компьютере испытательной машины. Массив  $\{\varphi_i\}$  формируется в системе ФАСИ из последовательности видеок кадров, на которых из отражающих состояние поверхности фрагмента образца в выбранные моменты времени. На рис. 4 показан график в координатах « $\sigma\varphi$ - $\sigma$ ».

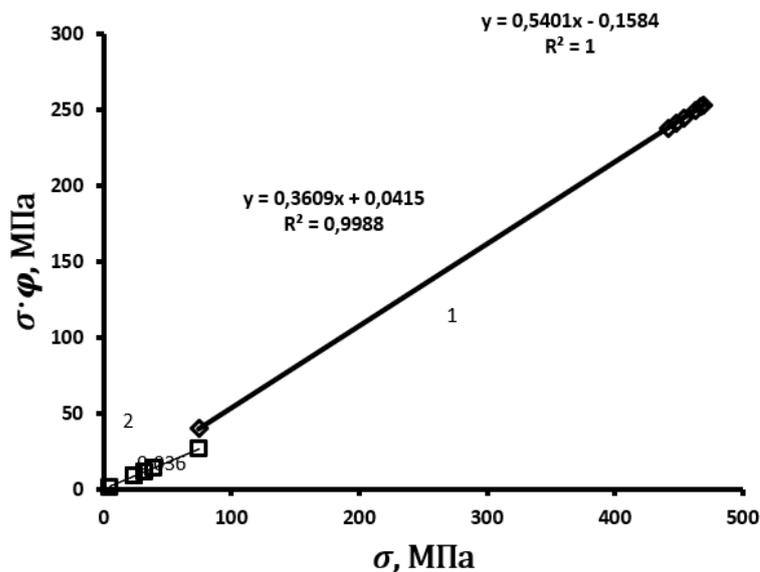


Рисунок 4. Кривая растяжения образца из монокристалла Мо в координатах « $\sigma\varphi$ - $\sigma$ »: 1 – зависимость построена по данным эксперимента *in situ*; 2 – зависимость построена по данным рентгеновских измерений

Следует отметить, что результаты экспериментов по растяжению образцов из монокристалла молибдена можно представить в линейной форме в координатах « $\sigma\varphi$ - $\sigma$ » (рисунок 5).

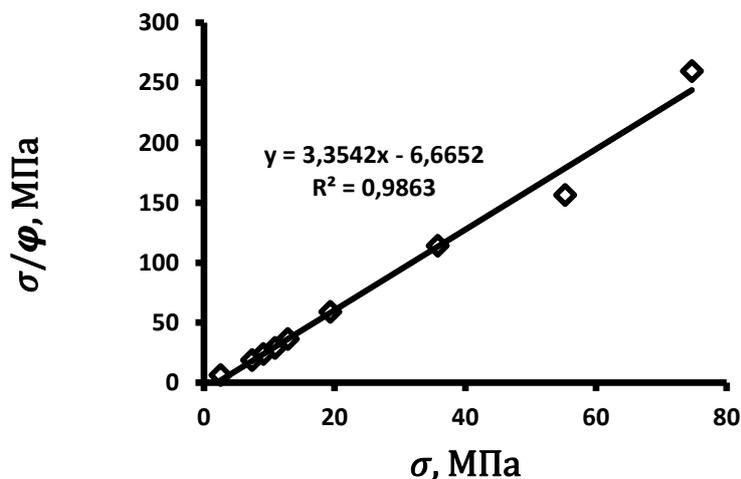


Рисунок 5. Результаты экспериментов по растяжению образцов из монокристалла молибдена

Результаты экспериментов *in situ* образцов из монокристаллов Мо имеет ряд преимуществ перед другими. У нее высокие показатели точности судя по значениям коэффициента репрезентативности ( $R^2$ ). Линейный характер зависимостей упрощает их аналитическое представление формулой вида  $\sigma\varphi = a\sigma + b$ . Значения обобщенного структурного фактора  $\varphi$  получают прямым измерением на фрагменте изображения исследуемого образца. Визуализация исследуемого фрагмента для изучения методом ФАСИ возможна любым оптическим приборе: видеокамеры, фотокамеры, оптические, электронные микроскопы (как просвечивающие, так и растровые сканирующие. Объекты исследований готовятся по простым технологиям. Результаты исследования с помощью ФАСИ обладают высокой воспроизводимостью, простотой и получаются высокой производительностью и могут быть получены в любых условиях: лабораторных, стендовых, полигонных. Исследования могут быть выполнены на образцах, натуральных объектах. Параметры напряженно деформированного могут измеряться по фотоматериалам без их разрушения состояния. Измерения выполняются бесконтактным способом. Полученные на образцах, монокристаллах из молибдена, результаты стимулировали их проверку на поликристаллических сплавах, являющихся конструкционными материалами на основе железа, титана и алюминия. Их результаты полностью подтвердили ранее полученные на монокристаллах молибдена. На рис. 6, 7, 8 показаны некоторые результаты на этих материалах.

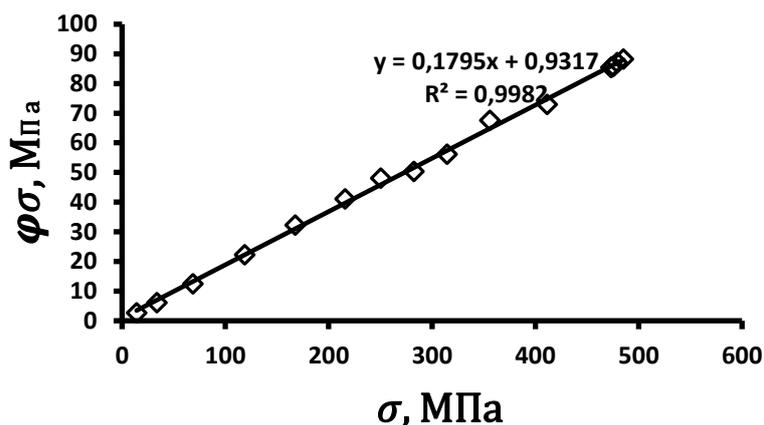


Рисунок 6. Кривая растяжения образца из стали 30ХГСА в координатах « $\sigma\varphi$ - $\sigma$ »

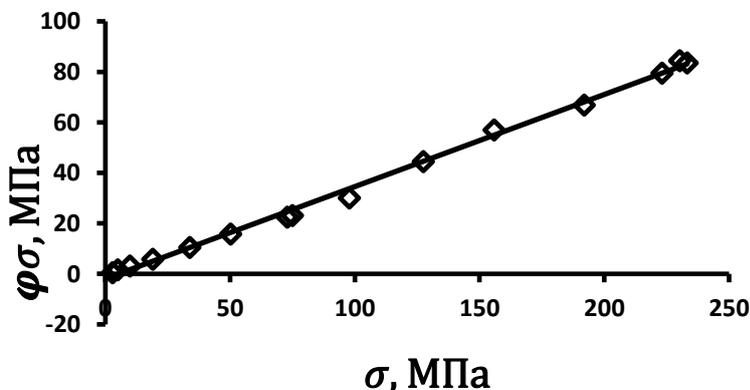


Рисунок 7. Зависимость  $\sigma\varphi = f(\sigma)$  для титанового сплава ВТ-18

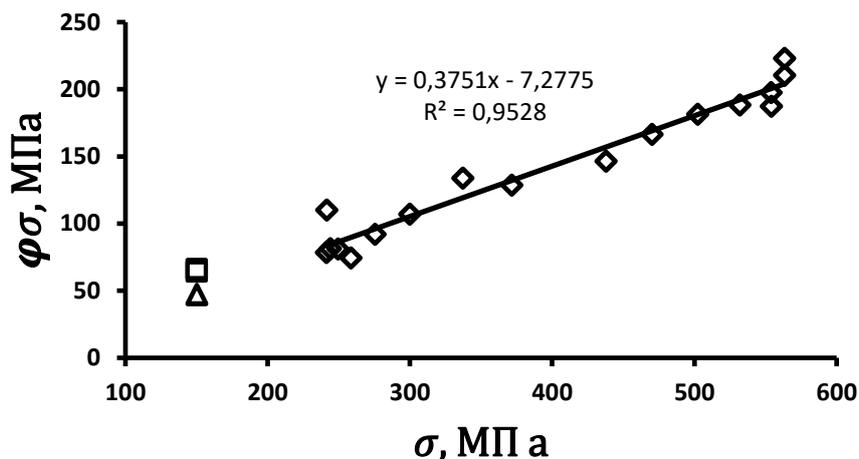


Рисунок. 8. Зависимость  $\varphi\sigma = f(\sigma)$  для алюминиевого сплава В95

Из рисунков 6 – 8 видно, что образцы из конструкционных сплавов на основе железа, титана и алюминия в поликристаллическом состоянии при деформировании растяжением подчиняются тем же закономерностям, что и образцы из монокристаллов из молибдена. Таким образом, деформирование поликристаллических образцов из наиболее распространенных сплавов с ОЦК, ГЦК и ГПУ кристаллическими решетками подчиняются общим закономерностям, установленных нами на монокристаллах молибдена. В таблице 2 приведены химические составы сплавов в поликристаллическом состоянии.

Таблица 2. Химические составы выбранных сплавов (масс. %)

Сплав	Fe	Si	Cr	Mn	C	Cu	Ni	Al	Mo	Nb	Zn	Ti	N	H	P
30ХГСА	95,7	0,9-1,2	0,8-1,1	0,8-1,1	0,28-0,3	<0,3	<0,3								0,025
ВТ-18	<0,15	0,5-1,0	0,8-1,1		<0,1				0,2-1,0	0,5-1,5		76,82	<0,05	0,015	
В95	0,5	0,5	0,1-0,25	0,2-0,6		1,4-2		93,2			5-7				<0,05

Основным результатом проведенных исследований было установление формулы, описывающей связь между механическими характеристиками сплавов и монокристаллов молибдена с обобщенным структурным фактором, численно равным площади под спектральной кривой интенсивности падающего светового потока, аккумулированного в образцах, деформируемых образцах ( $\varphi$ ). В таблице 3 приведены формулы взаимосвязи механических характеристик исследованных материалов с их обобщенными структурными факторами.

Таблица 3. Связь механических характеристик с их обобщенными структурными факторами

Марки сплавов	Формулы связи	Кристалл. решетки	$\varphi$	R <sup>2</sup>
Mo	$\sigma\varphi = 3,351\sigma - 6,665$	ОЦК	0,481	0,986
30ХГСА	$\sigma\varphi = 0,179\sigma + 0,931$	ОЦК	0,203	0,998
18ВТ	$\sigma\varphi = 0,364\sigma - 1,905$	ГПУ	0,358	0,996
В95	$\sigma\varphi = 0,375\sigma - 7,277$	ГЦК	0,222	0,952
30ХГСА	$\varepsilon\varphi = \exp(-5) + 6\exp(-5)$	ОЦК	0,203	0,977

Следует отметить, что представление зависимости  $\varepsilon\varphi = f(\sigma)$  прямой линией совершенно аналогично зависимости  $\varphi\sigma = f(\sigma)$ , что было подтверждено анализом результатов эксперимента по растяжению образцов стали 30ХГСА.

#### 4. Заключение

Результаты растяжения образцов из конструкционных сплавов на основе Fe, Ti и Al при их анализе методом ФАСИ приводят к линейной зависимости, аналогичной той, которая ранее (в 2021г) на монокристаллах молибдена.

Разработан критерий, который в обобщенном виде описывает структурные особенности материалов, численно равный той части площади под спектральной кривой, которая соответствует аккумуляции энергии спектра светового потока, падающего на образец.

Вид зависимости механических характеристик от обобщенного структурного фактора  $\varphi$  не зависит от вида кристаллической решетки металлов, послуживший основой для конструкционных сплавов.

Работа выполнена по Государственному заданию № 075-00320-24-00.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. Киев: Наукова думка, 1972. - 508 с.
2. Новицкий В. Теория упругости. Пер.с польск. М. Мир. 1975г. 872с.
3. Ляв А. Е. Математическая теория упругости ОНТИ 1935 672 с.
4. И. И. Новиков, В. А. Ермишкин, В. С. Гребнева Исследование механизма вязкого разрушения монокристаллов молибдена методом высоковольтной электронной микроскопии - Физика твердого тела Т 25, №7, 1983 С. 2096-2104
5. Новиков И. И., Ермишкин В. А. Физическая механика реальных материалов. М.: Наука, 2004. - 328 с.
6. Новиков И. И., Ермишкин В. А. Микромеханизмы разрушения металлов - Москва: Наука, 1991. – 365 с.
7. Ермишкин В. А., Лепешкин Ю. Д., Мурат Д. П., Овчинников И. Н. «Способ фотометрической диагностики структурного состояния материалов по данным анализа цифрового кодированного изображения их поверхности». Патент №2387974, 2010. Бюл. № 12.
8. Ермишкин В. А., Минина Н. А., Федотова Н. Л. «Способ фотометрической диагностики фазовых превращений в твердых телах по данным анализа спектров яркости отражения света от их поверхности», Патент №2387978, 2010. Бюл. №12.
9. В. Шмидт Оптическая спектроскопия для химиков и биологов пер. с англ. Москва: Техносфера, 2007. - 363 с.
- 10 Косевич А. М. Теория кристаллической решетки (физическая механика кристаллов). Учебное пособие для студентов физических и физико-технических спец. Харьков: Издательство при Харьковском государственном университете издательского объединения "Вища школа", 1988 303 с.

Поступила в редколлегию 08.02.2024 г.

**В. А. Лебедев**, канд. техн. наук, проф., **О. Н. Котенко**

(Донской государственной технической университет, г Ростов-на-Дону. РФ)

Тел. 89515395159, [E-mail-va.ledidev@yandex.ru](mailto:E-mail-va.ledidev@yandex.ru)

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ДОПУСКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА ИЗДЕЛИЯ

*Предложена методика расчета эксплуатационного допуска, обеспечивающего стабильность размеров функционального параметра и, как следствие, работоспособность изделия в условиях эксплуатации, характеризующихся влиянием временных и температурных факторов.*

**Ключевые слова:** функциональный параметр изделия, рабочий допуск, внешнее воздействие, точность, стабильность размеров.

**V. A. Lebedev, O. N. Kotenko**

## METHODOLOGY FOR CALCULATING THE OPERATING TOLERANCE OF A FUNCTIONAL PARAMETER OF A PRODUCT

*A methodology for calculating the operating tolerance that ensures dimensional stability of a functional parameter and, as a consequence, product performance under operating conditions characterized by the influence of time and thermal factors is proposed.*

**Keywords:** functional parameter of the product, operating tolerance, external influence, accuracy, dimensional stability.

Точность параметра изделия, определяющего его функциональное назначение, зависит от размерной точности влияющих на него деталей, достигаемой на стадии их изготовления [1-4].

При эксплуатации изделия на него оказывают влияние фактор времени и различные внешние воздействия. Наиболее характерными видами воздействия являются тепловые, колебательные. Под влиянием времени и внешних воздействий в деталях происходят явления, приводящие к изменению их линейных размеров, которые вызывают изменение функционального параметра. Степень изменения функционального параметра под влиянием времени и воздействующих факторов оценивают таким свойством, как стабильность. – это свойство параметра сохранять свое значение неизменным (постоянным) относительно начального значения при воздействии факторов окружающей среды и с течением времени [1, 3].

На практике стабильность функционального параметра изделия обычно оценивают по отдельным эксплуатационным факторам. При рассмотрении таких факторов, как температура и время, используют температурный допуск и временной допуск. При рассмотрении других факторов используют допуски, ограничивающие отклонения функционального параметра, обусловленные действием рассматриваемых факторов. Совместную оценку точности и стабильности выходных параметров выполняют с помощью эксплуатационного допуска [3].

Эксплуатационный допуск функционального параметра устанавливают на основе знания технологического допуска, температурного допуска, временного допуска и других допусков в зависимости от того, какие факторы принимаются во внимание.

При эксплуатации изделий под воздействием меняющихся сочетаний дестабилизирующих факторов происходит смещение и изменение поля рассеивания суммарного разброса функционального параметра. В этом случае закон распределения суммарной погрешности функционального параметра оказывается случайным и в

зависимости от сочетания эксплуатационных факторов может принимать любую форму. Однако для определения эксплуатационных допусков важно лишь знать предельный разброс функционального параметра. Поэтому при расчетах суммарных допусков необходимо учесть возможные сочетания эксплуатационных факторов, наиболее неудачные с точки зрения разброса функционального параметра.

Для количественной оценки точности функционального параметра можно использовать  $M(y)$  – математическое ожидание (среднее значение) и  $\sigma(y)$  – среднее квадратическое отклонение функционального параметра  $y$ , которое характеризует разброс функционального параметра, обусловленный только технологическими погрешностями влияющими на него размеров деталей.

В основу оценки стабильности функционального параметра положено уравнение относительной погрешности, обусловленной действием того или иного эксплуатационного фактора в виде:

$$\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_j = \sum_{i=1}^n B_i \left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_j, \quad (1)$$

где  $B_i$ -коэффициент влияния  $i$ -го размера детали на функциональный параметр.

$\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_j$  - относительное изменение  $i$ -го размера детали, вызываемое действием  $j$ -го эксплуатационного фактора.

Применение этого уравнения для оценки стабильности функционального параметра не представляется возможным в силу случайного характера величин  $\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_j$ .

Однако это уравнение позволяет получить рабочие формулы, используемые при определении температурных допусков и временных допусков.

Методика определения эксплуатационного допуска функционального параметра  $y$  изделия предусматривает следующую последовательность действий.

#### 1. Анализ и уточнение исходных данных.

В качестве исходных данных для расчета эксплуатационного допуска выступают:

- математическая модель, раскрывающая физическую сущность и точность функционального параметра изделия, и его размерную связь с параметрами деталей, оказывающими непосредственное влияние на него;

- факторы внешнего воздействия на изделие в процессе эксплуатации и их численные значения (диапазон температур, интервал времени эксплуатации, акустические характеристики и др).

- вероятность гарантированного обеспечения допуска  $P$ .

#### 2. Определение (или уточнение) параметров технологического допуска функционального параметр изделия:

- математическое ожидание (среднее значение):

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_\Pi = \sum_{i=1}^n M\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_\Pi, \quad (2)$$

- половину поля рассеивания технологического допуска:

$$\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_\Pi = P \sqrt{\sum_{i=1}^6 B_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_\Pi K_i^2}, \quad (3)$$

где  $K_i$  – коэффициент относительного рассеивания, согласно гипотезе о равновероятностном распределении размеров равен  $K_c = 1/3$ .

$P$  – коэффициент гарантированного обеспечения допуска; зависит от вероятности, с которой гарантируется допуск.

технологический допуск:

$$\Delta_{\Pi} = \xi \left\{ \left[ M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_{\Pi} \pm \delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_{\Pi} \right] \right\}, \text{ мкм} \quad (4)$$

3. Определение параметров температурного допуска функционального параметра изделия.

– математическое ожидание (среднее значение):

$$M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_{T} = \sum_{i=1}^n M \left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)_{T}, \quad (5)$$

где  $\left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)_{T} = a_i \Delta T$ ;

$a_i$  – температурный коэффициент  $i$ -й детали, показывающий, как изменяется размер при изменении температуры на один градус; имеет размерность [мм/град С];

$\Delta T = T_{\text{ср}} - 20^{\circ}$ , где  $T_{\text{ср}}$  – температура окружающей среды (наибольшая по условиям эксплуатации), °С;

– половину поля рассеивания температурного допуска:

$$\delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_{T} = P \sqrt{\sum_{i=1}^6 B_i^2 \delta^2 \left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)_{T} K_i^2}, \quad (6)$$

– температурный допуск:

$$\Delta_T = \left[ M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_{T} \pm \delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_{T} \right], \text{ мкм} \quad (7)$$

4. Определение параметров временного допуска функционального параметра изделия.

– математическое ожидание (среднее значение):

$$M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_{t} = \sum_{i=1}^n M \left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)_{t}, \quad (8)$$

где  $\left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)_{t} = \beta_i \Delta t$ ,

$\beta_i$  – временной коэффициент  $i$ -й детали; показывающий изменение размера детали за каждый час времени эксплуатации; имеет размерность [мм/час];

$\Delta t$  – рассматриваемый интервал гарантированного времени эксплуатации изделия / час.

– половину поля рассеивания временного допуска:

$$\delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_{t} = P \sqrt{\sum_{i=1}^6 B_i^2 \delta^2 \left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)_{t} K_i^2}, \quad (9)$$

– временного допуск:

$$\Delta_t = \left[ M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_t \pm \delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_t \right], \text{ мкм}, \quad (10)$$

5. Определение максимальных пределов смещения среднего значения суммарной относительной погрешности функционального параметра, относительно среднего значения технологического допуска по формуле:

$$M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Sigma = M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Pi + M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_T + M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_t, \quad (11)$$

где  $M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Sigma$  - сумма средних значений.

6. Определение половины поля рассеивания суммарной относительной погрешности функционального параметра:

$$\delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Sigma = \sqrt{\left[ \delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Pi \right]^2 + \left[ \delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_T \right]^2 + \left[ \delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_t \right]^2}, \quad (12)$$

Характеристика  $\delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Sigma$  гарантируется с такой же вероятностью, с которой подсчитывались составляющие подкоренного выражения.

7. Устанавливаем значение эксплуатационного допуска как:

$$\Delta_\Sigma = \xi \left\{ \left[ M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Sigma - \delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Sigma \right] \dots \left[ M \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Sigma + \delta \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Sigma \right] \right\}, \text{ мкм}, \quad (13)$$

где  $\xi$  – коэффициент запаса, учитывающий влияние неучтенных факторов (давление, влажность и т.д.).

Ниже приведен расчет эксплуатационного допуска на функциональный параметр электромеханического датчика давления.

### Исходные данные

Параметр  $\delta$ , определяющий функциональное назначение СП – зазор между торцами винта и контакта согласно ТУ равен  $\delta_0 = 0,3_{-0,1}$  мм

Размерная цепь и физическая сущность входящих в неё звеньев приведены на рисунке. 1 и в таблице 1.

Диапазон рабочих температур 20-350°C;

Интервал времен -87600час;

Акустическое воздействие в процессе эксплуатации -15Гц;

Вероятность гарантированного обеспечения допуска Р- 0,75.

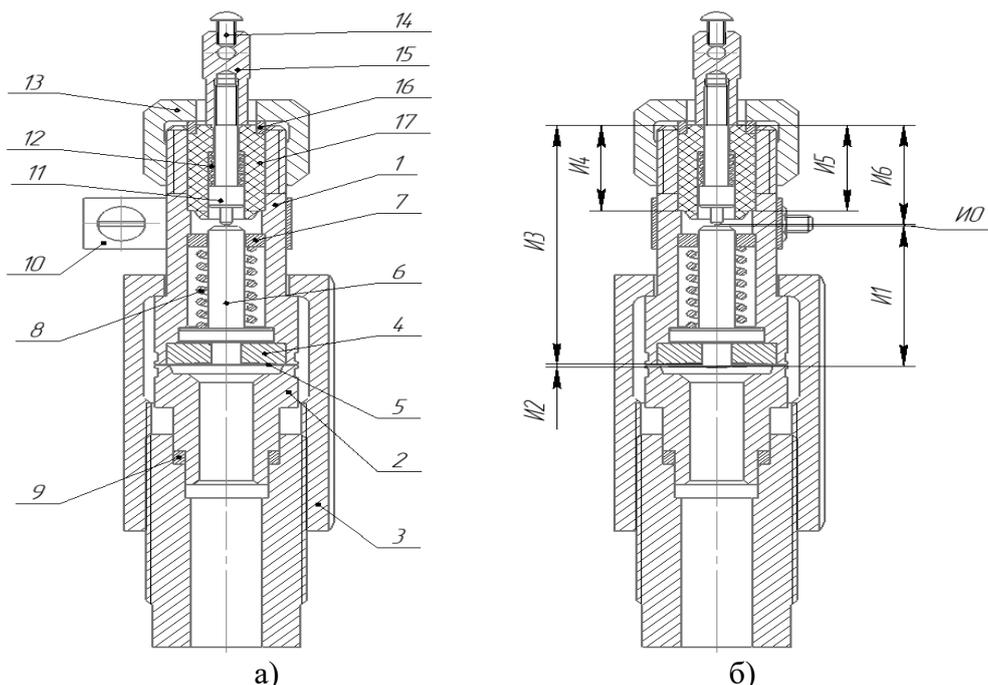


Рисунок 1. Датчик давления: а – конструкция; б – размерная цепь:  
 1 – корпус; 2 – стакан; 3, 13 – гайка; 4 – вкладыш; 5 – мембрана;  
 6 – толкатель; 7 – шайба; 8, 12 – пружина; 9, 16 – прокладка; 10 – хомут;  
 11 – контакт; 14 – винт; 15 – наконечник; 17 – изолятор

Физическая сущность звеньев размерной цепи и назначенные отклонения размеров деталей сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Физическая сущность звеньев размерной цепи

Звено	Физическая сущность звеньев	Размер, мм
И <sub>0</sub>	Зазор между торцами винта и контакта	0,3 <sub>-0,1</sub>
И <sub>1</sub>	Размер толкателя, описывающий расположение его основной базы относительно исполнительной поверхности	32,5 <sub>-0,5</sub>
И <sub>2</sub>	Вылет толкателя за торец прижима (размер деформации мембраны).	0,2 <sup>+0,1</sup>
И <sub>3</sub>	Габаритный размер корпуса. (Размер, описывающий расположение торца корпуса относительно его основной базы или вспомогательной базы вкладыша)	55,7h14 <sub>(-0,74)</sub>
И <sub>4</sub>	Размер проточки корпуса (размер между вспомогательными базами)	20H14 <sup>(+0,52)</sup>
И <sub>5</sub>	Размер изолятора (размер между основной и вспомогательной базами)	20 <sup>(+0,183</sup> <sub>-0,203)</sub>
И <sub>6</sub>	Длина винта от исполнительной поверхности до участка начала резьбы	23,1 <sup>+0,56</sup>

Результаты расчета по вышеизложенной методике приведены в таблице 2.

Таблица 2. Расчет эксплуатационного допуска функционального параметра датчика

№	Определяемый допуск	Расчетная формула	Расчетный параметр, мм
1	Технологический допуск	2, 3, 4	$\Delta_{\Pi} = (-0,05 \pm 0,052) \approx 0_{-0,102}^{+0,002}$
2	Температурный допуск	5, 6, 7	$\Delta_T = (-0,016 \pm 0,014)$
3	Временной допуск	8, 9, 10	$\Delta_t = (+0,038 \pm 0,0002)$
4	Эксплуатационный допуск	11, 12, 13	$\Delta_{\text{Э}} = (-0,0792 \dots 0,0176) \approx (0_{-0,08}^{+0,02})$

### Заключение

Предложенная методика позволяет на стадии конструкторско-технологической подготовки изготовления изделия провести размерно-точностной анализ конструкции с учетом условий его эксплуатации.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дальский, А. М. Сборка высокоточных соединений в машиностроении / А. М. Дальский, З. Г. Кулешова. – М.: Машиностроение, 1988. - 304 с.
2. Инженерия поверхности деталей / под ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2008. 320 с
3. Мельников А. С., Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э, Азарова А. И. Научные основы технологии машиностроения. – Из-во Лань, СПб 2018.
4. Боровиков С. М. Теоретические основы конструирования, технологи и надежности. Мн, Дизайн ПРО, 1998-336с.
5. Польский Е. А., Филькин Д. М. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации // Научные технологии в машиностроении. 2014. №11 (41). С. 36 – 44.

Поступила в редколлегию 12.02.2024 г.

**И. С. Линьков, А. И. Симонов**

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия*

*Тел./Факс: 8(863-65) 7-90-864 E-mail: ilya.linckow@yandex.ru*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ (НА ПРИМЕРЕ СМАЗКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИИЗОБУТИЛЕНА)**

*Функциональные свойства покрытий зависят от адгезионной прочности. В статье рассматривается подход, позволяющий путем расчета энергетических характеристик жидких составов, предназначенных для формирования покрытий, оценить прочность сцепления покрытия с защищаемой поверхностью. Разработана программа в среде Visual Studio, позволяющая рассчитывать энергетические характеристики исходных жидких композиций. На примере разделительного покрытия на основе полиизобутилена установлена корреляция работы адгезии жидкости с адгезионной прочностью покрытия.*

*Ключевые слова:* жидкость, энергетические характеристики, покрытие, адгезия.

**I. S. Lin'kov, A. I. Simonov**

## **PREDICTION OF ADHESION STRENGTH OF COATINGS (ON THE EXAMPLE OF POLYISOBUTYLENE-BASED GREASE)**

*The functional properties of the coatings depend on the adhesive strength. The paper considers an approach that allows, by calculating the energy properties of liquid compositions intended for the formation of coatings, to assess the adhesion strength of the coating to the protected surface. A program has been developed in the Visual Studio environment that allows you to calculate the energy characteristics of the initial liquid compositions. Using the example of a polyisobutylene-based separation coating, the correlation of the work of liquid adhesion with the adhesive strength of the coating has been established.*

*Keywords:* liquid, energy characteristics, coating, adhesion.

### **1. Введение**

Свойства защитных покрытий в значительной мере обусловлены их адгезионной прочностью. Адгезионная прочность зависит от множества факторов: свойств среды, силы, определяющий сцепление разнородных материалов, характера изменения этой силы отрыва, методов определения. Понятие «адгезия» подразумевает взаимодействие между молекулами контактирующих материалов. Независимо от методов оценки адгезионной прочности, прямых или косвенных, основным критерием является возможность сделать заключение – обеспечит формируемое покрытие эксплуатационные свойства, или нет.

В настоящей работе предложен подход, позволяющий путем оценки энергетических характеристик исходных жидких составов, предназначенных для получения покрытий, прогнозировать адгезионную прочность покрытий к защищаемой поверхности. О наличии связи между этими характеристиками свидетельствует ряд опубликованных работ [1, 2]. Исследовано антиадгезионное покрытие на основе полиизобутилена, предназначенное для защиты технологической оснастки при изготовлении композиционных материалов.

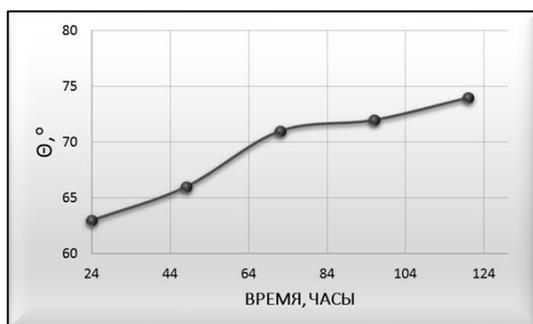
Цель работы – произвести оценку энергетических характеристик жидкого раствора на основе полиизобутилена и выявить взаимосвязь этих характеристик с адгезионной прочностью формируемого разделительного покрытия.

## 2. Материалы и методы

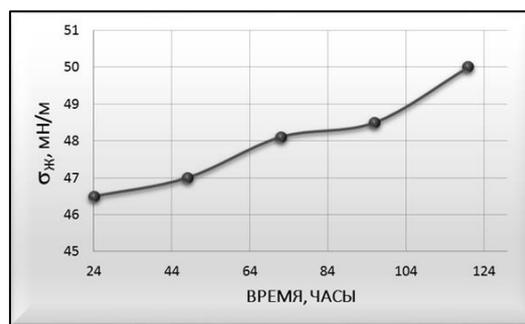
Для формирования покрытия использовали раствор полиизобутилена П-200 в нефрасе. Покрытия формировали на стальной подложке (40Х), методом налива, в два слоя, в соответствии с рекомендациями изготовителя. Слои сушили 25 минут на воздухе, затем в термошкафу 4 часа, при температуре 100 °С. Экспериментально определяли краевой угол смачивания (КУС) раствора к стальной поверхности ( $\theta$ ) и поверхностное натяжение раствора ( $\sigma_{ж}$ ). Измерения проводились в течение пяти суток, с интервалом 24 часа, при температуре  $(23 \pm 1)$  °С. Изготовитель рекомендует использовать раствор в течение 4 суток после изготовления. Поэтому, для получения более полной информации, контроль состава осуществлялся также на пятые сутки. В эксперименте использовали метод «сидячей капли» и кольцевой метод Дю-Нуи. Расчет энергетических характеристик – работы адгезии ( $W_a$ ), когезии ( $W_k$ ), смачивание ( $W_э$ ), относительную работу адгезии (сцепление) рассчитывали по методике, изложенной в работе [3]. Для численных расчетов энергетических характеристик была разработана программа в среде Visual Studio, на языке программирования С#. Адгезионная прочность покрытий оценивалась балльным методом решетчатых надразов. Морфология покрытий изучалась с помощью микроскопа для металлографии ADFU300 КТИ (филиала) ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова.

## 3. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показано влияние времени выдержки растворов на величины КУС и поверхностного натяжения. Из рисунков видно, что значения характеристик возрастают почти линейно.



а)



б)

Рисунок 1. Влияние времени выдержки состава на основе полиизобутилена на величину краевого угла смачивания - (а) и величину поверхностного натяжения - (б)

Величины  $\theta=90$  °С КУС не достигает, поверхность стали остается гидрофильной, смачивается. Следует отметить, что смазка хорошо растекается по поверхности, образуя тонкую сплошную пленку. Поверхностное натяжение меняется заметно на пятые сутки  $\sim 2$  мН/м.

Блок-схема разработанной программы приведена на рисунке 2. Полученные результаты расчета энергетических характеристик отражены в таблице 1. По мере увеличения времени выдержки жидкого состава, уменьшается работа адгезии и энергия смачивания жидкостью стальной поверхности. Работа когезии для исследуемого состава возрастает.

Таблица 1. Энергетические характеристики жидкого состава на основе полиизобутилена

Время, часы	24	48	72	96	120
$W_a$ , мДж/м <sup>2</sup>	67,4	66,1	63,7	63,5	64,0
$W_k$ , мДж/м <sup>2</sup>	93,0	94	96,2	97	100,0
$W_э$ , мДж/м <sup>2</sup>	21,1	19,1	15,6	15,0	14,0

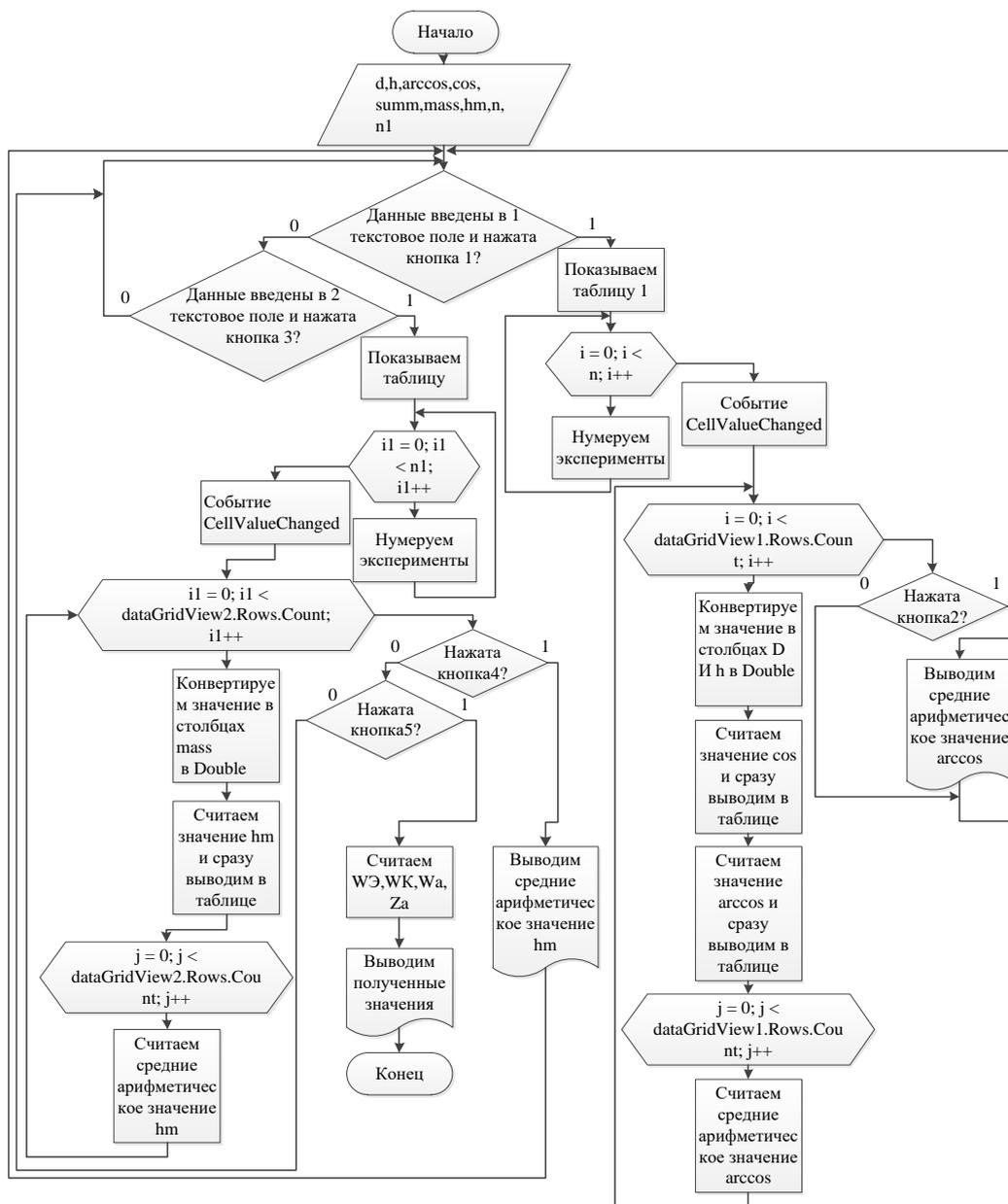


Рисунок 2. Блок-схема программы, разработанная для расчета энергетических характеристик состава на основе полиизобутилена

В таблице 2 приведены результаты расчета относительной работы адгезии жидкого состава к поверхности, и адгезионной прочности покрытия, определенной с помощью метода решетчатых надрезов. Здесь «0» баллов – наилучшая адгезия, «5

баллов» - наихудшая. Хорошую адгезионную прочность покрытие имеет для состава, выдержанного не более 2 суток (0-1 балл). По истечении 4 суток адгезионная прочность покрытия ухудшается до 3 баллов (до 35 % отслоения покрытия). Из данных таблицы 2 следует, что адгезионная прочность коррелирует с относительной работой адгезии: по мере уменьшения сцепления жидкости со стальной подложкой ухудшается адгезионная прочность покрытий.

Таблица 2. Сопоставление относительной работы адгезии (сцепления) жидкого состава на основе полиизобутилена и его адгезионной прочности.

Время, часы	24	48	72	96	120
Сцепление, %	70	70	66	66	63
Адгезионная прочность, баллы	0	1	2	2	3

Морфологические исследования, проведенные с помощью оптической микроскопии, показали, что при формировании покрытия из раствора, выдержанного в течение суток, отслоения практически не наблюдаются (рисунок 3).

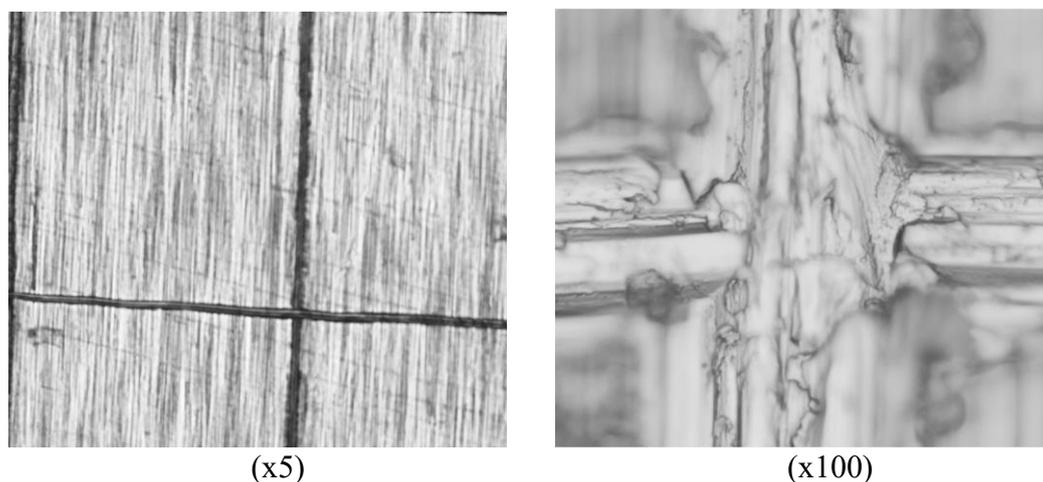


Рисунок 3. Состояние поверхности покрытия с полиизобутиленом (время выдержки жидкого состава 24 часа)

По истечении пяти суток выдержки раствора сформированное покрытие после нанесения надрезов на поверхность легко отделяется от стальной подложки, адгезионная прочность резко падает (рисунок 4).

Оценка поверхностной пористости с помощью программного модуля «ADID» (методика расчета изложена в работе [4, 5], показала, что поверхностная пористость покрытия плавно возрастает от 0,3 % (24 час) до 1,9 % (120 часов). Это свидетельствует о формировании тонкой сплошной защитной пленки.

#### 4. Заключение

Исследованы зависимости краевого угла смачивания и поверхностное натяжение разделительной системы на основе полиизобутилена от времени выдержки состава.

– По мере увеличения продолжительности выдержки жидких смазок угол смачивания и поверхностное натяжение системы возрастают.

– Произведен расчет энергетических характеристик исходных составов к стальной поверхности. Определено, что в интервале выдержки раствора от 24 часов до 120 часов работа адгезии жидкой смазки уменьшается, а работа когезии возрастает.

– Методами оптической микроскопии выявлено, что минимальное количество поверхностных дефектов в покрытиях формируется при использовании жидкой смазки, выдержанной не более 48 часов.

Установлена корреляция адгезионной прочности покрытий и относительной работы адгезии жидких смазок к стальной поверхности.

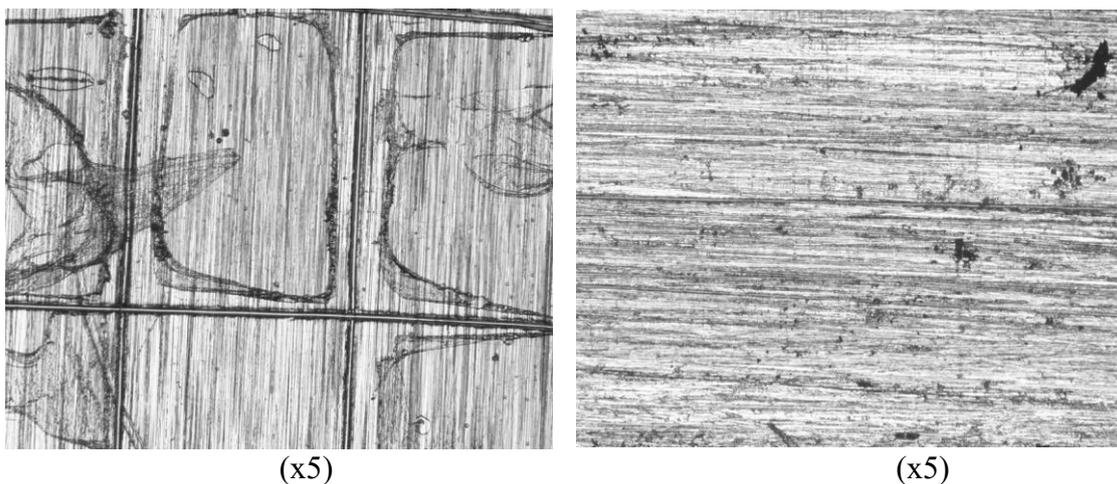


Рисунок 4. Состояние поверхности покрытия с полиизобутиленом (время выдержки жидкого состава 120 часов)

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Антонова, Н. М. Исследование антикоррозионных свойств органических полимерных покрытий с порошками алюминия и циркония / Н. М. Антонова, А. П. Бабичев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 2(134). С. 35-39. EDN VKTVAN.

2. Смачивание, поверхностное натяжение и работа адгезии расплавов стекол  $As_2S_3$   $NAS_2Se_3$  к кварцевому стеклу / С. В. Мишинов, М. Ф. Чурбанов, В. С. Ширяев, I. Н. Снопатин // Физика и химия стекла. 2016. Т. 42, № 6 С. 713-720. EDN YGDKMT.

3. Антонова, Н. М. Оценка адгезионной прочности защитных композиционных покрытий по работе адгезии к твердому телу исходной суспензии / Н. М. Антонова // Коррозия: материалы, защита. – 2011. – № 9. – С. 36. – EDN OCQVPV.

4. Антонова, Н. М. Оценка дефектов поверхности изделий с помощью цифровых технологий / Н. М. Антонова, Е. Ю. Хаустова // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 11(108) С. 24-32. DOI 10.30987/1999-8775-2021-11-11-19. EDN OVKXME.

5. Антонова, Н. М. Показатели качества и снижение трудоемкости испытаний лакокрасочных покрытий путем применения цифровых технологий к анализу поверхности покрытий / Н. М. Антонова, О. С. Овчинников // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 7(103). – С. 502-515. – EDN KPKSTQ.

Поступила в редколлегию 13.02.2024 г.

УДК 621.793, 691.9.048.4

**Н. М. Чигринова**, д-р техн. наук, проф.

Белорусский национальный технический университет г. Минск, Республика Беларусь  
Тел./Факс: +375 17 293 95 81; E-mail: chigrinova@ya.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

*В работе предложена математическая модель энергомеханической интенсификации метода электроискрового легирования за счет применения дополнительного ультразвукового воздействия с разработкой и определением взаимосвязи составных частей системного анализа, включающих моделирование на уровне математических аналогий, структуризацию, иерархию и исследование законов протекания взаимодействий в системе металл – среда – покрытие, связь системы с условиями эксплуатации. Приведены физические модели плазменных явлений при электроискровом легировании как основа для разработки теории интегральной технологии с участием ультразвука.*

**Ключевые слова:** Интегральная технология электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием, анодно-катодные взаимодействия, электроразряд, вибрация анода, эрозия электрода, затвердевание капли.

**N. M. Chigrinova**

## MODELING THE PROCESS OF ENERGY-MECHANICAL INTENSIFICATION OF MICROPLASMA PROCESSING IN A GAS ENVIRONMENT

*The paper proposes a mathematical model of the energy mechanical intensification of the electric spark doping method by applying additional ultrasonic influence with the development and determination of the relationship of the components of the system analysis, including modeling at the level of mathematical analogies, structuring, hierarchy, and study of the laws of interaction in the metal-medium-coating system, the relationship of the system with operating conditions. Physical models of plasma phenomena in electric spark doping are presented as a basis for developing the theory of integral technology involving ultrasound.*

**Keywords:** Integrated technology of electric spark doping with additional ultrasonic influence, anode-cathode interactions, electric discharge, anode vibration, electrode erosion, drop solidification.

### 1. Введение

Микроплазмоискровая обработка в газовой среде, к которой в полной мере можно отнести и метод электроискрового легирования (ЭИЛ), широко применяется для защиты рабочих поверхностей деталей машин и оборудования, металлорежущего инструмента и штамповой оснастки от интенсивного абразивно-механического износа, восстановления изношенных деталей вследствие формирования в критических зонах износостойких покрытий. Операции восстановления в некоторых случаях являются финишными, дающими возможность исключения последующей механической обработки для получения требуемых размеров, укладываемых в допуски.

Однако в типовом методе ЭИЛ, несмотря на многочисленные исследования и разработки по его совершенствованию, и сегодня имеются нерешенные задачи: ограниченная мощность стандартного оборудования, малый диапазон регулирования колебаний электрода по частоте и амплитуде, что обуславливает формирование покрытий с неоднородной структурой и нерегулярным рельефом обработанной поверхности. При этом созданные покрытия отличаются высокой шероховатостью и пористостью, ограниченной толщиной. Совершенствование упрочненных, восстановленных или модифицированных в процессе стандартного электроискрового легирования (ЭИЛ) изделий, а также созданных на их поверхностях покрытий связано с

оптимизацией их структурного состояния. Авторы предложили реализовать желаемый результат за счет повышения интенсивности энергии механического воздействия на материал в результате применения ультразвука [1]. С этой целью была разработана интегральная технология ЭИЛ с УЗВ на разных стадиях обработки металлической поверхности.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Электроискровое легирование, будучи разновидностью искровых микроплазменных процессов обработки металлических материалов, осуществляется в условиях регулируемого электрического разряда в воздушной среде и, благодаря электротермическому действию импульсного электрического тока, обеспечивает перенос материала анода (электрод) на катод (деталь) в процессе изменения положения электродов относительно друг друга [2, 3].

При сближении электродов напряженность электрического поля увеличивается и, достигнув определенной величины, вызывает воздушный пробой промежутка между электродами. Возникает канал сквозной проводимости, формирующий микродуговой газовый разряд. Появляющийся при этом ток пробоя по своей природе является импульсным током. Он вызывает локальный разогрев и плавление материала анода, приводит к локальному разогреву ионов воздуха, их стремительному расширению (взрыву), увеличению зоны пробоя, отрыву и осаждению на поверхность катода материала анода. После этого разряд прекращается.

Объем плазмы, образуемой при электрическом разряде в момент возникновения искры между анодом и катодом, увеличивается в течение времени  $t$ , длительность которого обычно составляет менее 100 мкс. В результате расплавления материала анода окружающий эродирующий материал плотный «жидкий» диэлектрик сдерживает рост плазмы, фокусируя энергию  $UIt$ , в малой области. При этом локальные плазменные температуры могут достигать  $\sim 40\,000$  К. Здесь  $t$  – длительность электроискрового разряда. Первым быстро расплавляется анод вследствие поглощения высокоэнергетичных электронов в начале процесса образования плазмы [2, 3].

В общем случае система для осуществления процесса ЭИЛ состоит из катода, анода и разделяющего их газообразного диэлектрика (рисунок 1).

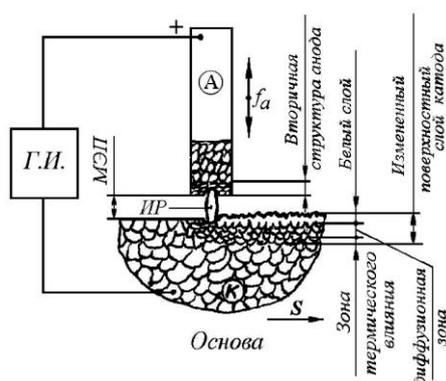


Рисунок 1. Общая схема процесса ЭИЛ

ГИ – генератор импульсов, МЭП – межэлектродный промежуток, ИР – искровой разряд, А – анод (компактный электрод), К – катод (деталь),  $f_a$  – частота вибрации анода, S – направление подачи детали [3]

Затем, спустя несколько микросекунд, анод начинает затвердевать. Это объясняется расширением радиуса плазмы около анода, что приводит к уменьшению локального теплового потока на поверхности анода. Расплавление катода запаздывает по времени по сравнению со временем расплавления анода вследствие низкой мобильности положительных ионов вблизи анода. Более того, поскольку катод эмитирует электроны, радиус плазмы на катоде также гораздо меньше, что обеспечивает применимость модели точечного теплового источника в этом промежутке между анодом и катодом.

После завершения процесса переноса материала анода на катод в плазменном канале и остывания перенесенного объема, наступает пауза  $\delta$  между двумя последовательными электроискровыми разрядами. В течение этого периода происходит коллапс плазменного канала и пузыря с паром, что приводит к взрыву в диэлектрике перегретого, расплавленного металла на поверхности обоих электродов. Часть переносимого материала испаряется и мелкими каплями расплескивается в воздух, а другая затвердевает в полости, образовавшейся на поверхности катода. Эти полости “заглаживаются” в процессе механических с ультразвуковой частотой биений подвижного электрода (анода) по поверхности катода, что приводит к формированию сверхгладких, наноструктурированных приповерхностных областей [3].

Известно [4, 5], что образование и прирост толщины покрытия при электроискровом легировании обусловлены эрозией легирующего электрода. При этом определяющими параметрами эрозионного процесса являются прежде всего длительность обработки  $t$  и длительность паузы между последовательными искровыми разрядами  $\delta$ , определяющих объем переносимого материала. Поэтому для определения скорости эрозионного переноса материала анода на катод были выбраны указанные временные характеристики, а решение задачи оптимизации параметров эрозионного процесса базируется на следующих физических законах:

- 1) на основе модели теплопроводности от точечного источника при искровом разряде рассчитан объем эродировавшего материала анода;
- 2) на основе модели теплопроводности от мгновенного сферического источника тепла рассчитано время остывания расплавленной капли материала эродировавшего анода в результате искрового разряда;
- 3) на основе экспериментальных данных по зависимости потери массы анода от времени проведения процесса ЭИЛ решена оптимизационная задача расчета минимальной длительности паузы между двумя последовательными искровыми разрядами при прохождении стадий интегрального метода ЭИЛ с УЗВ;
- 4) с использованием оптимизационной методологии оценено влияние вольт-амперных характеристик установки «Элитрон», а также времени процесса УЗВ на скорость эрозии анода в процессе искрового разряда.

Скорость эрозии электрода обусловлена объемом проэродировавшего материала анода в единицу суммарной длительности импульса и паузы между двумя последовательными разрядами.

Для разработки модели эрозии электрода при ЭИЛ сделаны следующие допущения:

- 1) только один искровой разряд приходится на каждый импульс напряжения, и радиус плазмы в процессе разряда остается достаточно малым (менее 5 мкм), что позволяет использовать модель точечного теплового источника;

2) эффективные (средние) физические свойства материалов электродов применимы ко всему диапазону температур (от твердого состояния до жидкого в расплавленном состоянии);

3) при расчете полного объема эрозии и длительности импульса не учитывается наличие начальной полости, обусловленной асимптотическим температурным профилем в анодно-катодной зоне;

4) постоянная доля  $F_c$  мощности от полной, выделяемой при электрическом разряде, теряется на аноде независимо от величины тока и длительности импульса.  $F_c$  может изменяться при использовании электродов иного химического состава.

Последующие рассуждения и расчеты будут применяться к интегральному методу ЭИЛ с УЗВ, в процессе которого применяется серийное электроискровое оборудование типа «Элитрон», и дополнительного ультразвукового воздействия, осуществляемого с помощью серийных установок УИЛ-2. При этом принимается, что анодно-катодное взаимодействие, т.е. контакт легирующего электрода (анода) и обрабатываемого объекта (катода) может быть представлено как работа матрицы и пуансона в пресс-форме. Продолжительность ультразвукового воздействия с частотой  $f = 20 - 40$  кГц не превышает 25–50 мкс. При указанных длительностях импульса скорость эрозии достаточно мала, что обусловлено длительным временем остывания и затвердевания материала на катоде. При интегральной ЭИЛ с УЗВ обработке электрод (анод) не обязательно должен физически контактировать с обрабатываемой поверхностью катода, т.е. в принципе, анод не может оказывать силовое воздействие на поверхность катода (за исключением воздействия, обусловленного давлением плазмы).

Уравнение теплопроводности без источников, описывающее процесс электрического разряда, имеет в цилиндрической системе координат следующий вид [5]:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (1)$$

где  $\alpha = \frac{k_T}{\rho C_p}$  – коэффициент термодиффузии.

где  $k_T$  – теплопроводность материала анода,  $\rho$  – его плотность и  $C_p$  – его теплоемкость при постоянном давлении.

Начальные условия для решения уравнения (1) можно представить в следующем виде:

$$t = 0, \quad \forall r, \quad T = T_0 \quad (2)$$

а граничные условия:

$$-k_T \frac{\partial T}{\partial r} = q_0, \quad \text{для } r = 0, \quad (3)$$

$$-k_T \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \text{для } r = \infty,$$

$$\text{и } T = T_0 \text{ при } t > 0 \text{ и } r = \infty, \quad (4)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды,  $q_0$  – мощность тепловыделения.

Результирующее распределение температуры с учетом граничных и начальных условий:

$$T = T_0 + \left( \frac{F_c UI}{2\pi k_T r} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (5)$$

Если обозначить радиус расплавленной зоны как  $R$ , когда  $T=T_m$ , то выражение (5) примет вид:

$$T(R) = T_m = T_0 + \left( \frac{F_c UI}{2\pi k_T R} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{R}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (6)$$

где  $T_m$  – температура плавления материала анода;  $t$  – время процесса эрозии.

Соотношение (6) позволяет выразить зависимость радиуса капли расплавленного в процессе электроискрового разряда материала анода  $R(t)$  от длительности электроискрового разряда  $t$ .

Предположим, что начальная температура капли размером  $0 \leq r \leq R$  составляет 10000 К, и на ее поверхности происходит конвективный теплообмен с окружающей средой, имеющей температуру  $T_0$ . Для определения момента времени, начиная с которого в центре капли будет иметь место регулярный режим, т.е. в ней установится температура  $T_0$ , используем уравнение распространения тепла в сферических координатах [5, 6]:

$$\partial_t T(t, r) - a^2 \left( \partial_{r,r} T(t, r) + \frac{2}{r} \partial_r T(t, r) \right), \quad (7)$$

если отсутствуют внешние источники тепла.

Параметр  $\alpha = k_T / \rho C_P$  в (7), как и в уравнении (1) – коэффициент термодиффузии.

Теплообмен на границе капли описывается уравнением Ньютона:

$$\partial_r T(t, R) = \frac{h}{k_T} (u_1 - T(t, R)), \quad (8)$$

где  $h$  – коэффициент теплообмена анода.

Уравнения (7) и (8) совместно с начальным условием  $T(0, r) = u_0 = 10000$  смешанная задача. Радиус капли  $R$  определяется путем минимизации целевой функции по фактическим данным.

Смешанная задача решается методом разделения переменных [3, 4] и ее решение имеет вид:

$$T(r, t) = T_0 + 2(u_1 - u_0) h R^2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\xi_n^2 + (hR - 1)^2}}{\xi_n (\xi_n^2 + h^2 R^2 - hR)} \exp \left( -\frac{a^2 \xi_n^2 t}{R^2} \right) \frac{\sin \left( \frac{\xi_n r}{R} \right)}{r} \quad (9)$$

где  $\xi_n$  – положительные корни трансцендентного уравнения:

$$\operatorname{tg}(\mu) = -\frac{\mu}{Rh-1}, \tag{10}$$

Проанализируем влияние величины коэффициента теплообмена на результат решения уравнения (8).

На рисунке. 2 приведены зависимости, являющиеся решением трансцендентного уравнения (9) при  $h=0.1$ . Ординаты точек пересечения кривых являются корнями уравнения (9).

Анализ результатов численного решения трансцендентного уравнения (9) показал слабую зависимость корней этого уравнения от величины параметра  $h$ : так, увеличение значения этого параметра на 4 порядка от  $10^{-1}$  до  $10^3$  привело к значениям его первых двух положительных корней соответственно от (4.49341, 7.72525) до (4.49544, 7.72643). Заметное изменение корней этого уравнения происходит только при значении  $h=10^6$ : (2.80883, 5.67371).

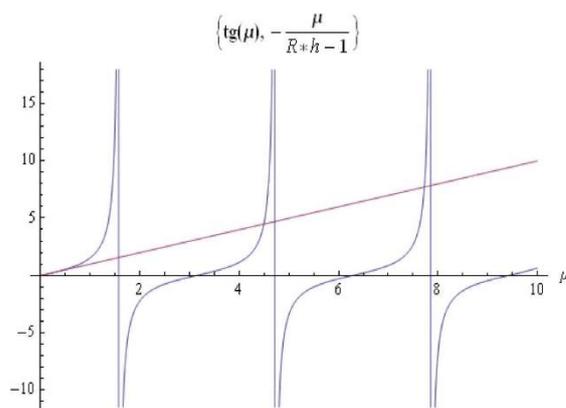


Рисунок 2. Решение трансцендентного уравнения (9) при значении параметра  $h=0.1$

Решение уравнения (9) при  $h=10^6$  иллюстрируется рисунке 3.

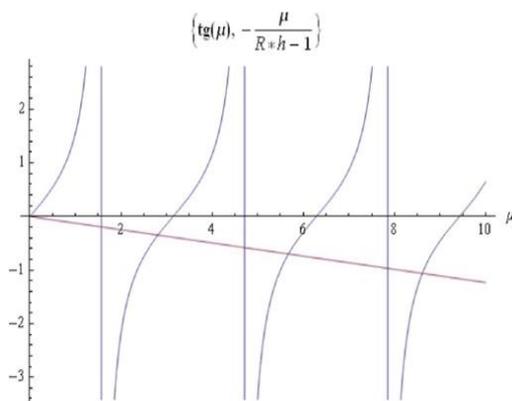


Рисунок 3. Решение трансцендентного уравнения (9) при значении параметра  $h=10^6$

Зависимость температуры в центре капли от времени выражается следующим образом:

$$T(0,t) = u_1 + 2(u_1 - u_0)hR \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\xi_n^2 + (hR-1)^2}}{(\xi_n^2 + h^2R^2 - hR)} \text{Exp}\left(-\frac{a^2 \xi_n^2 t}{R^2}\right) \quad (10)$$

Если  $hR < 1$  (что соответствует случаю  $h < 6.14662 \times 10^6$ ), то при всех значениях времени  $t$ , удовлетворяющих неравенству:

$$t \geq t_* \stackrel{def}{=} -\frac{R^2}{a^2(\xi_1^2 - \xi_2^2)} \ln\left(\frac{\xi_2^2 + h^2R^2 - hR}{\xi_1^2 + h^2R^2 - hR} \sqrt{\frac{\xi_1^2 + (hR-1)^2}{\xi_2^2 + (hR-1)^2}}\right) \quad (12)$$

в центре капли заведомо будет иметь место регулярный режим.

В таблице 1 приведены значения длительности остывания капли  $t$ , вычисленные из выражения (11), в зависимости от величины константы  $h$ .

Таблица 1. Длительность остывания капли  $t$ , вычисленные из выражения (12), в зависимости от значения константы  $h$ .

$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1	$1 \cdot 10^{-1}$
$3.109158 \cdot 10^{-8}$	$9.093769 \cdot 10^{-8}$	$9.098667 \cdot 10^{-8}$	$9.098671 \cdot 10^{-8}$

### 3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили заключить и реализовать следующее:

1) Одной из основ моделирования изучаемых процессов является их термомеханодинамика, обобщаемая критериальными или линеаризованными уравнениями.

Для решения указанных задач разработано несколько физико-математических моделей:

- физико-математическая модель расчета объема материала анода, эродированного в одном искровом разряде в процессе ЭИЛ, на основе модели теплопроводности от точечного источника (что справедливо для искрового разряда);

- физико-математическая модель расчета времени остывания капли расплавленного материала анода, эродированного в результате искрового разряда, с использованием модели теплопроводности от мгновенного сферического источника тепла.

- решена задача оптимизации параметров и режимов ЭИЛ с применением модели малых колебаний системы, в основе которой лежит предположение, что в зависимости от очередности воздействия, характера и мощности затраченной механической энергии при ЭИЛ катода интегрально меняется его исходная структура. В терминологии теории малых колебаний систем с конечным числом степеней свободы совокупность таких состояний можно интерпретировать в форме коэффициентов влияния в дифференциальном уравнении, описывающем свободные колебания механических систем.

2) С помощью оптимизационной методологии оценено влияние вольт–амперных характеристик установок «Элитрон» и «УИЛ», а также времени процесса легирования на скорость эрозии анода в процессе искрового разряда.

– посредством анализа численного решения задач теплопроводности с мощным точечным тепловым источником тепловыделения и остывания без источников, показано, что время остывания капли эродированного анода заметно меньше других временных параметров, характеризующих процесс легирования.

– проведены сравнительные оценки временных параметров – длительностей электроискрового разряда и паузы между двумя последовательными разрядами.

– определен период ультразвуковых вибраций анода с целью оптимизации совместного воздействия электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием.

– анализ результатов решения уравнения теплопроводности, описывающего процесс остывания капли расплавленного в результате электроискрового разряда материала анода, показал:

– входящие в уравнение теплопроводности корни  $\xi$  трансцендентного выражения слабо зависят от материального параметра – коэффициента теплообмена  $h$  между каплей эродирующего материала и средой;

– время остывания капли  $t$  материала анода, осевшей на поверхность катода, чрезвычайно мало и составляет десятые доли микросекунды, что на порядки величин меньше других временных параметров, характеризующих процесс УЗВ: период между двумя последовательными электроискровыми разрядами (~50 мкс), длительность электроискрового разряда (~100 мкс), период продольных биений анода, колеблющегося с ультразвуковой частотой (25–50 мкс), что следует учитывать при выработке рекомендаций для выбора технологических параметров проведения процесса УЗВ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Чигринова, Н. М. Инновации в электроискровых технологиях: теория и практика. / Н. М. Чигринова // Монография. - Мн.: изд-во «Бестпринт». – 2019. – 267 с.

2. Лазаренко, Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко, Б. Р. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 12–16.

3. Верхотуров, А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.

4. Сафронов, И. И. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя / И. И. Сафронов [и др.]. – Кишинев, 1999. – 591 с.

5. A. Yahya and C. D. Manning Modelling, simulation and controller design for Electro Discharge Machine System // Electronic Systems and Control Division Research, 2003, P.21-23.

6. Revaz, B. Local temperature response to pulsed discharges in electronic discharge machining (EDM) environment / B. Revaz [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – Vol. 33, Issue 3. – P. 1066–1071.

Поступила в редколлегию 13.02.2024 г.

УДК 621.825.54

**М. П. Шишкарев**, д-р техн. наук, проф.*Донской государственной технической университет, РФ**Тел.: 89081933393; E-mail: [shishkarev\\_m\\_p@mail.ru](mailto:shishkarev_m_p@mail.ru)*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С БИФУНКЦИОНАЛЬНЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

*На примере адаптивной фрикционной муфты с бифункциональным управляющим устройством, выполняющим функции нажимного узла и отжимного стабилизирующего устройства, показана целесообразность назначения больших величин коэффициента усиления обратной связи для повышения точности срабатывания, и его минимальных величин для оптимального сочетания нагрузочной способности и точности срабатывания муфты.*

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, бифункциональное управляющее устройство, точность срабатывания, нагрузочная способность.

**M. P. Shishkarev**

## OPTIMIZATION OF OPERATION INDEXES OF THE ADAPTIVE FRICTIONAL CLUTCH WITH THE BIFUNCTIONAL ACTUATION DEVICE

*On an example of an adaptive frictional clutch with the bifunctional actuation device executing functions of a press node and the squeezing stabilising device, the expediency of assignment of the big magnitudes of an amplification factor of a feedback for heightening of exactitude of operation, and its minimum magnitudes for an optimum combination of load ability and exactitude of operation of a clutch is displayed.*

**Keywords:** an adaptive frictional clutch, the bifunctional actuation device, exactitude of operation, load ability.

### 1. Введение

Адаптивные фрикционные муфты (АФМ) имеют в своем составе управляющее устройство (УУ), которое позволяет автоматически регулировать усилие прижатия друг к другу поверхностей трения, передающих нагрузку, в зависимости от текущей величины коэффициента трения [1]. Благодаря наличию обратной связи АФМ обеспечивают более высокую стабильность предельного вращающего момента при значительных колебаниях величины коэффициента трения и приближают по величине текущий предельный вращающий момент к настроечному (номинальному) вращающему моменту муфты.

Однако применяемые в современной технике АФМ обладают существенным недостатком, заключающимся в невысокой нагрузочной способности [1], что ограничивает возможности их применения.

Отмеченного недостатка лишена разработанная в последнее время АФМ с бифункциональным управляющим устройством (УУ) обратной связи [2]. В данной конструкции АФМ используется, как и в АФМ первого поколения, одноконтурная отрицательная обратная связь [3], однако, измененная компоновочная схема позволяет существенно повысить нагрузочную способность муфты. Изменение компоновочной схемы АФМ относится к расположению УУ между нажимным узлом и фрикционной группой муфты, в отличие от традиционных схем АФМ, в которых УУ располагается по другую сторону от фрикционной группы относительно нажимного узла.

Исследованием установлено, что нагрузочная способность и точность срабатывания АФМ с бифункциональным УУ увеличиваются по мере роста величины коэффициента усиления (КУ) обратной связи [4]. При постоянных радиальных габаритах АФМ увеличение нагрузочной способности возможно только за счет повышения силы при-

жания друг к другу пар трения фрикционной группы. Однако указанное увеличение силы прижатия ограничено допускаемым давлением на поверхностях фрикционных контактов [5]. В связи с этим реальное увеличение нагрузочной способности АФМ возможно за счет увеличения ее радиальных габаритов (при увеличении усилия прижатия друг к другу пар трения) или путем увеличения числа пар трения, что неизбежно ведет к увеличению осевых габаритов АФМ.

Увеличение нагрузочной способности АФМ с бифункциональным УУ и соответствующее ему увеличение габаритных размеров муфты ведет к росту ее массы и момента инерции, что ухудшает эксплуатационные характеристики привода и машины в целом.

С другой стороны, повышение точности срабатывания АФМ за счет увеличения КУ позволяет уменьшить действующие в приводе нагрузки и, тем самым, оптимизировать размеры и совокупную массу элементов привода, защищаемых муфтой от чрезмерных перегрузок.

Таким образом, можно предположить, что величина КУ АФМ с бифункциональным УУ, влияющая на нагрузочную способность и точность срабатывания, должна быть оптимальной для того, чтобы обеспечить оптимальные показатели привода машины. Критерием указанной оптимизации величины КУ может быть максимальный прирост нагрузочной способности АФМ при наибольшем увеличении точности ее срабатывания на любом участке изменения величины КУ.

**Цель исследования.** Получение расчетных зависимостей для вычисления величины КУ АФМ с бифункциональным УУ, обеспечивающей оптимальное соотношение между нагрузочной способностью и точностью срабатывания муфты на конкретном участке изменения величины КУ.

**Задачи исследования.** 1. Определение оптимальных минимальных значений КУ обратной связи. 2. Исследование влияния на точность срабатывания АФМ значения КУ обратной связи.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Для решения поставленной задачи рассмотрим принципиальную схему АФМ с бифункциональным УУ, приведенную на рисунке. 1. Полумуфты 1 и 2 кинематически связаны между собой пакетом фрикционных дисков 3 и 4. Диски 3 связаны со ступицей нажимного диска 5 посредством подвижного в осевом направлении шлицевого соединения, диски 4 связаны с барабаном полумуфты 2 аналогичным способом. Нажимной диск 5 не имеет кинематической связи с полумуфтой 1 в окружном направлении.

Слева (по рисунку 1, а) пакет фрикционных дисков 3 и 4 опирается на упорный диск 6 посредством упорного подшипника 7, следовательно, нажимной диск 5 передает полный вращающий момент муфты.

Передача нагрузки от полумуфты 1 на нажимной диск 5 (в том случае, если полумуфта 1 является ведущей) или от нажимного диска на полумуфту 1 (если ведущей является полумуфта 2) осуществляется посредством тел качения 8. Последние размещены в скошенных гнездах нажимного диска 5 и опорного диска 9, жестко закрепленного на ступице полумуфты 1 (см. рисунок 1, б, сечение А-А).

Силовое замыкание пакета фрикционных дисков 3 и 4 осуществляется за счет тангенциально установленных пружин 10, которые опираются на бобышки 11, закрепленные соответственно на нажимном 5 и жестко закрепленном на ступице полумуфты 1 опорном 9 дисках. Окружные силы пружин 10, действуя на нажимной диск 5, создают момент сил, благодаря которому тела качения 8 заклиниваются в гнездах между их

противоположными стенками (рис. 1, б, сечение А-А). В результате этого между телами качения и стенками гнезд возникает сила нормального давления (имеется в виду сила, приведенная к одному гнезду), осевая составляющая которой создает усилие замыкания пар трения фрикционной группы.

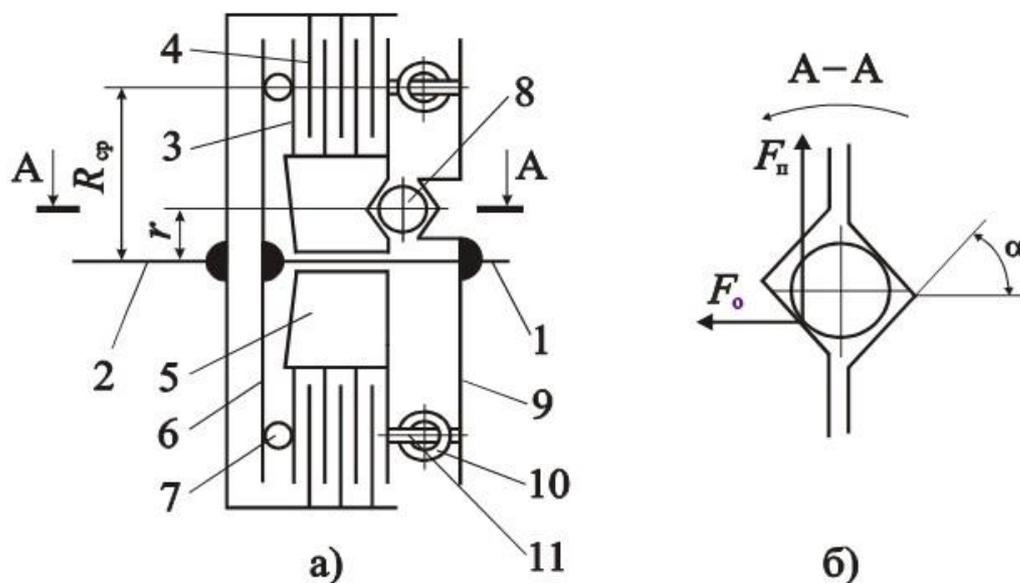


Рисунок 1. Принципиальная схема АФМ с бифункциональным УУ

Благодаря этому УУ АФМ, состоящее из дисков 5 и 9, а также из тел качения 8, выполняет одновременно функцию нажимного устройства, обеспечивающего возбуждение сил трения между парами фрикционной группы и, следовательно, передачу нагрузки муфтой.

В связи с тем, что УУ муфты выполняет две функции, данной муфте присвоено указанное название.

В рассматриваемой АФМ использована возможность регулирования силы натяжения пружин 10 и, следовательно, величины передаваемого вращающего момента (устройство для изменения силы натяжения пружин на рис. 1 не показано).

Формула для вычисления величины предельного вращающего момента, передаваемого муфтой, приведена в работе [6] и имеет следующий вид:

$$T_{\text{н}} = zF_{\text{н}}R_{\text{ср}}C \frac{f}{1 + zCf}, \tag{1}$$

где  $z$  – число пар трения 3–4;  $F_{\text{н}}$  – суммарная начальная сила натяжения пружин 10;  $R_{\text{ср}}$  – средний радиус поверхностей трения фрикционных дисков 3 и 4;  $f$  – коэффициент трения между фрикционными дисками 3 и 4;  $C$  – КУ отрицательной обратной связи АФМ:

$$C = \frac{R_{\text{ср}}}{r} \operatorname{tg} \alpha, \tag{2}$$

$\alpha$  – угол скоса гнезд под тела качения 8 (рис. 1, б, сечение А-А);  $r$  – радиус окружности, на которой расположены тела качения 8 (рис. 1, а).

Далее будем считать, что  $\alpha = \text{const}$ .

Для оценки точности срабатывания предохранительных муфт, в том числе АФМ, используется коэффициент точности [7], величина которого для рассматриваемой муфты вычисляется, с учетом соотношения (1), по формуле:

$$K_T = \frac{f_{\max}(1 + zCf_{\min})}{f_{\min}(1 + zCf_{\max})}, \quad (3)$$

где  $f_{\max}$  – максимальное значение, которое может принимать коэффициент трения в реальных условиях эксплуатации АФМ;  $f_{\min}$  – соответственно минимальное значение коэффициента трения.

Функция (1) возрастает по аргументу  $C$  при  $f = \text{const}$ , как установлено в работе [8]. Функция (2), согласно данным работы [1], убывающая по аргументу  $C$ . Формально, с данной точки зрения, оптимальной по критерию нагрузочной способности и точности срабатывания АФМ будет максимально возможная величина КУ  $C$ . Для АФМ любого типа эта величина составляет 5...6 [9], поскольку, во-первых, дальнейшее увеличение КУ  $C$  не приводит к существенному повышению точности срабатывания муфты, во-вторых, при указанных значениях КУ  $C$  муфта работает неустойчиво при передаче нагрузок, близких по величине к предельным [9].

Однако, как отмечено выше, увеличение КУ  $C$  приводит к соответствующему увеличению габаритов и массы АФМ. В соответствии с этим, увеличение нагрузочной способности и точности срабатывания АФМ с бифункциональным устройством за счет увеличения КУ  $C$  представляется рациональным только до определенного предела.

Определение оптимальной величины КУ  $C$ , обеспечивающей оптимальную нагрузочную способность и соответствующую ей точность срабатывания АФМ будем производить по критерию максимального повышения величины вращающего момента муфты в определенном интервале изменения величины КУ  $C$ . Действительно, при меньшем увеличении вращающего момента в равных интервалах изменения величины КУ  $C$  требуется больший относительный прирост габаритных размеров и массы муфты, следовательно, в данном случае рассматриваемый вариант нельзя считать оптимальным.

Для определения оптимальной величины КУ  $C$  воспользуемся следующим приемом. При разбиении общего интервала изменения величины КУ  $C$  на отдельные равные друг другу участки примем следующую зависимость:

$$C_i = nC_{i-1}, \quad (4)$$

где  $C_i$  – увеличенное (последующее) значение КУ  $C$  при варьировании его величины;  $n$  – коэффициент:  $n > 1$ ;  $C_{i-1}$  – предыдущее значение КУ  $C$ .

В формуле (3) полагаем, что  $n = \text{const}$ , поскольку речь идет о равных участках разбиения общего интервала значений КУ  $C$ .

При оценке степени увеличения нагрузочной способности АФМ в результате варьирования величины КУ  $C$  воспользуемся следующим отношением:

$$p = \frac{T_n(C_i)}{T_n(C_{i-1})}, \tag{5}$$

где  $T_n(C_i)$ ,  $T_n(C_{i-1})$  – предельный вращающий момент АФМ соответственно при увеличенном и предыдущем значении КУ  $C$ .

Выразив из соотношения (3) параметр  $C_{i-1}$  через параметр  $C_i$  и используя соотношение (1), получим, с учетом формулы (4), следующее выражение:

$$p = \frac{nC_i f_{\min} (1 + C_i f_{\min} / n)}{C_i f_{\min} (1 + zC_i f_{\min})} = \frac{n + zC_i f_{\min}}{1 + zC_i f_{\min}}. \tag{6}$$

Для установления возможности максимума функции (5) продифференцируем ее один раз по переменной  $C_i$ , в результате чего получим:

$$p'(C_i) = \frac{z f_{\min} (1 - n)}{(1 + zC_i f_{\min})^2}. \tag{7}$$

Поскольку  $n > 1$ , производная (6) отрицательна во всем интервале изменения величины КУ  $C$ , следовательно, функция (5) максимума в указанном интервале не имеет и является убывающей. Поэтому увеличение КУ  $C$  нецелесообразно по принятому критерию.

Для оценки скорости убывания функции (5) рассмотрим графики, изображенные

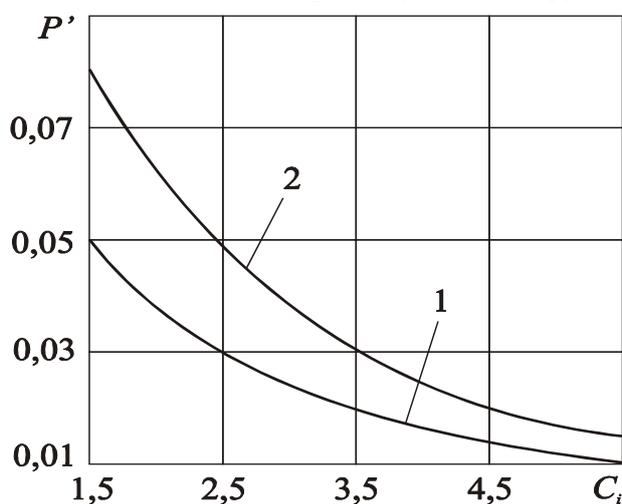


Рисунок. 2. Зависимость параметра  $p'$  от КУ  $C_i$

на рис. 2. Графики построены по следующим исходным данным:  $z = 6$ ,  $f_{\min} = 0,1$ . Кривая 1 построена при  $n = 1,3$ , кривая 2 – при  $n = 1,5$ . При построении графиков использована формула (6).

Графики показывают, что наибольшая скорость убывания функции (5) при изменении величины КУ  $C_i$  в области небольших значений ( $C_i = 1 \dots 1,5$ ). При изменении КУ  $C_i$  в области больших значений ( $C_i = 3,5 \dots 5,5$ ) скорость убывания функции (5) заметно (в 2,5...5 раз) падает. Поэтому в случае использования АФМ с достаточно большой первоначальной величиной КУ  $C_i$  (4...5) его увеличение с целью повышения

нагрузочной способности муфты может быть оправданным.

Изменение величины коэффициента  $n$  приводит к изменению модуля производной (6), однако на ее характер не влияет.

Изменим подход к оптимизации величины КУ  $C$  по установленному критерию. Новый подход основан на оптимизации величины комплексного параметра, включающего параметры  $C$  и  $K_T$ . Теоретическое обоснование данного подхода заключается в следующем.

Увеличение КУ  $C$ , сопровождаемое повышением точности срабатывания АФМ, приводит к увеличению габаритных размеров и массы привода машины. Однако повышение точности срабатывания АФМ позволяет уменьшить максимальные напряжения, действующие в деталях привода при перегрузках и, соответственно, их размеры и массу.

Таким образом, при увеличении нагрузочной способности АФМ уменьшается относительное рассеяние величины предельного вращающего момента муфты за счет повышения точности ее срабатывания. В соответствии с этим комплексной характеристикой оптимизации величины КУ  $C$  должно быть произведение величины номинального вращающего момента на величину коэффициента точности, т. е:

$$p_1 = T_{\text{ном}} K_T. \quad (8)$$

С учетом формулы (1), а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [10], можно записать:

$$T_{\text{ном}} = z F_{\text{н}} R_{\text{ср}} C \frac{f_{\text{min}}}{1 + z C f_{\text{min}}}. \quad (9)$$

После подстановки правых частей соотношений (2) и (8) в формулу (7) получим:

$$p_1 = z F_{\text{н}} R_{\text{ср}} C \frac{f_{\text{max}}}{1 + z C f_{\text{max}}}. \quad (10)$$

В качестве критерия оптимальности изменения величины КУ  $C$  необходимо принять минимальное значение коэффициента  $p_1$ . Функция (9) возрастает по аргументу  $C$ , причем, характер ее изменения идентичен характеру изменения функции (1) по аргументу  $f$  [11]. Это означает, что увеличение нагрузочной способности АФМ при возрастании КУ  $C$  не может компенсировать повышение точности срабатывания муфты. Следовательно, абсолютное рассеяние величины предельного вращающего момента АФМ с увеличением КУ  $C$  будет возрастать, что неблагоприятно скажется на прочности узлов и деталей привода машины.

Следовательно, критерием оптимальности должна быть минимальная величина коэффициента  $p_1$ . Минимальным значениям последнего соответствуют минимальные величины КУ  $C$ .

Заметим, что, согласно соотношению (1), номинальная нагрузочная способность АФМ с бифункциональным УУ будет равна номинальной нагрузочной способности АФМ первого поколения [12], если принять  $C=1$ . В соответствии с этим, при оптимизации величины КУ  $C$  необходимо, с целью получения эффекта повышения нагрузочной способности АФМ с бифункциональным УУ, ограничивать минимальную величину КУ  $C$ , соблюдая условие  $C > 1$ .

Из соотношения (1) следует также, что АФМ с бифункциональным УУ нецеле-

сообразно использовать при величинах КУ  $C$ , таких, что  $C < 1$ , поскольку в данном случае ее нагрузочная способность будет ниже, чем у АФМ первого поколения, со значительным уменьшением точности срабатывания.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании АФМ с бифункциональным УУ для выбора оптимального значения коэффициента усиления обратной связи.

### 3. Заключение

По критерию максимального прироста величины вращающего момента АФМ с бифункциональным УУ оптимальными являются минимальные значения КУ обратной связи. Максимальная точность срабатывания муфты при этом не достигается.

При использовании АФМ с большой начальной величиной КУ целесообразно ее увеличение с целью повышения нагрузочной способности муфты.

По комплексному критерию оптимальности величины КУ, основанному на показателях нагрузочной способности и точности срабатывания АФМ с бифункциональным УУ оптимальными являются минимальные значения КУ.

При оптимизации величины КУ необходимо ее ограничение снизу значением, равным единице.

При значениях КУ, меньших единицы, точность срабатывания АФМ с бифункциональным УУ меньше, чем точность срабатывания АФМ первого поколения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шишкарев М. П. Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения с дифференцированными парами трения (ч. 2) // Известия ОрелГТУ. – 2008. – № 3-2/271 (546). – С. 67–71.
2. Шишкарев М. П. Повышение надежности адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 4. – С. 6–9.
3. Шишкарев М. П. Условие и возможность реализации высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 3. – С. 3–6.
4. Шишкарев М. П., Луцник А. А., Угленко А. Ю. Адаптивные фрикционные муфты второго поколения. Исследование, конструкции и расчет: монография. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – 236 с.
5. Шишкарев М. П. Влияние величины коэффициента усиления на массу адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 2. – С. 88–93.
6. А. с. 1055915 СССР, МПК<sup>3</sup> F 16 D 7/02, F 16 D 13/04. Предохранительная фрикционная муфта / М. П. Шишкарев (СССР). – № 3475963/25–27; Заявлено 28.07.82; Опубл. 23.11.83. Бюл. № 43. – 6 с.: ил.
7. Шишкарев М. П. Аналитическое обоснование оптимального способа настройки предохранительных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 3–6.
8. Шишкарев М. П., Луцник А. А. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» 25-28 февраля 2014 г., Ростов н/Д, 2014. – С. 206–209.

9. Шишкарев М. П. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел 2-го поколения // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVIII междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 «Компьютерная поддержка производственных процессов» / Под общ. ред. В.С. Балакирева – Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 72–76.

10. А. с. 1430633 СССР, МПК<sup>4</sup> F 16 D 7/02. Предохранительная фрикционная муфта / М. П. Шишкарев (СССР). – № 4048607/25–27; Заявлено 26.02.86; Опубл. 15.10.88. Бюл. № 38. – 3 с.: ил.

11. Шишкарев М. П. Распределение нагрузки в муфте Н.Д. Вернера и выбор ее параметров // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 6. – С. 8–11.

12. Шишкарев М. П., Ву Тьен Зунг. Практическая точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с переменным значением коэффициента усиления // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 3. – С. 3–7.

Поступила в редколлегию 15.02.2024 г.

УДК 621.793.71

**F. I. Panteleenko**, a member- correspondent. NAN B, Ph. D., Professor, **V. A. Okovity**, Ph. D., **O. G. Devoino**, Ph. D., Professor, **V. A. Sidorov**, Ph. D., associate Professor **V. V. Okovity**,

**A. A. Litvinko**, **V. Yu. Sereda**

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

*Tel. / Fax+375 17 293-95-99, niil\_svarka@bntu.by*

**V. M. Astashinsky**, a member- correspondent. NAS B, D. Phys. - math. n., prof.

*A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

*Tel. / Fax +375 17 284-24-91, ast@hmti.ac.by*

### PARAMETERS OF DEPOSITION OF MULTILAYER PLASMA COATINGS FROM MATERIALS BASED ON M-CROLL

*The article discusses the deposition parameters that are the most promising for operation under such wear conditions of the composition, which consist of a ceramic-metal matrix and an oxide component evenly distributed in it. The performance of such compositions is ensured by the high strength properties of the metal-ceramic matrix. The constant reproduction of this layer when working under friction conditions, evenly distributed throughout the entire volume of the material, creates the desired effect of self-lubrication. All of the above features suggest that plasma wear-resistant powder coatings will find wide application in technology, both protective and anti-friction. Atmospheric Plasma Spraying (APS) is a current commercially available technique that has been used by many researchers to create cost-effective coatings. The use of high temperatures and energy densities makes it possible to deposit coatings of refractory materials such as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> and mullite, which are difficult to melt with other conventional thermal spray processes.*

**Keywords:** metal-ceramic plasma coatings, heat-shielding and wear-resistant coatings, formed structures, physical, mechanical and operational properties, M-crawl, titanium dioxide-aluminum oxide, molybdenum.

**Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девоино, В.А.Сидоров, В.В. Оковитый, А.А.Литвинко, В.Ю.Серета, В.М. Асташинский**

### ПАРАМЕТРЫ НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛЛОВ НА ОСНОВЕ М-КРОЛЕЙ

*В статье рассматриваются параметры нанесения наиболее перспективными для работы в таких условиях износа композиции, которые состоят из металлокерамической матрицы и равномерно распределенной в ней оксидной составляющей. Работоспособность таких композиций обеспечивается высокими прочностными свойствами металлокерамической матрицы.*

*Постоянное воспроизведение данного слоя при работе в условиях трения, равномерно распределенной по всему объему материала, создает нужный эффект самосмазываемости. Все вышеперечисленные особенности позволяют предполагать, что плазменные износостойкие порошковые покрытия найдут широкое применение в техники, как защитные, так и антифрикционные. Атмосферное плазменное напыление (APS) - это действующий коммерчески доступный метод, который использовался многими исследователями для создания экономически выгодных покрытий. Использование высоких температур и плотности энергии позволяют наносить покрытия из тугоплавких материалов, таких как Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> и муллит, которые трудно расплавить с помощью других традиционных процессов термического напыления.*

**Ключевые слова:** металлокерамические плазменные покрытия, теплозащитные и износостойкие покрытия, формируемые структуры, физико – механические и эксплуатационные свойства, М-кроли, диоксид титана-оксидалюминия, молибден.

## 1. Introduction

Currently, in various industries, there are a large number of parts and assemblies operating under friction conditions (ball and cylindrical bearings, sliding current collectors, liners, thrust bearings, guides, end and side seals, hinged devices, etc.), in which wear-resistant materials are widely used. They function under various conditions - high speeds, high loads, in the presence of boundary friction or friction with lubrication, at elevated temperatures or in a vacuum. Corrosion processes, the adverse effects of wear, are the main causes of failure of metal structures and machine parts. For these reasons, about 80-90% of parts fail in the industry. All these circumstances do not make it possible to obtain a universal material for work in friction units. There is a need to obtain various materials for the given operating conditions in friction conditions. It is known from a review of the literature [1–15] that the most promising materials for obtaining wear-resistant plasma coatings that increase the durability and reliability of mechanisms and machines are those materials that can withstand maximum loads without plastic deformation in friction pairs in a wide range of operating temperatures and having the highest resistance to abrasive wear, the ability to work in aggressive environments and vacuum. The most promising for operation in such conditions are compositions that consist of a cermet matrix and an oxide component evenly distributed in it. shock in a high temperature atmosphere. In addition, they have the combined advantages of ceramic and metal, such as hardness and toughness. In addition, the effective use of wear-resistant coatings can be significantly improved by applying a subsequent modifying effect on their structure [8]. When processing wear-resistant plasma coatings with high-energy effects, their sources have a number of advantages: firstly, the locality and high concentration of the input energy, which makes it possible to act on the necessary area of the formed wear-resistant coating, without thereby violating, due to the general heating of the entire volume of its microstructure and required properties; secondly, the possibility of strict control of all the parameters of the impacts, which make it possible to form the structure of the layer being created, to regulate its roughness and the necessary geometric dimensions, to obtain the necessary parameters of wear resistance, total porosity, and hardness. However, one should always keep in mind the ability of a high-energy modification to change and redistribute residual stresses in the formed coating, especially at small coating thicknesses [9].

## 2. Optimization of parameters for deposition of plasma coatings from materials based on oxide ceramics

In accordance with the method developed by us, the optimization of plasma spraying of powder coatings on the UPU-3D installation was carried out according to the utilization factor of the sprayed powder material (CIP). In this case, the morphology of individual particles of powder materials deposited on the polished surface after their interaction with the base (substrate) (“Splat-test”) was also taken into account. Based on the results of inspection under a microscope for similar technological regimes as for the “Splat-Test”, an optimization process was carried out based on the creation of coatings with maximum CIP (powder material utilization factor).

In the process of obtaining sprayed wear-resistant layers from the developed powder materials, there are a large number of process factors that affect the properties of the protective coatings being created. The main factors are the speed of the devices for moving the plasma torch or substrate, the distance used for spraying, the consumption of the plasma-forming and transporting gases used, the consumption of the material used for spraying, the input power, depending on the voltage and current of the electric arc of the plasma torch [16-

19]. As an example, Figures 1-7 show characteristic dependencies, which, using the KPI-universal characteristic, show the effect on the efficiency of the process of the listed conditions and deposition modes.

A qualitative optimization of all the most important parameters of APS (plasma spraying in atmospheric conditions) of the process of creating wear-resistant coatings from powder materials Mo and NiCrAlTiTa (for creating sublayers), as well as Mo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> and NiCrAlTiTa-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> ( to create wear-resistant layers). It was carried out in stages. The first - for fixed indicators of the arc current and nitrogen forming the plasma, the distances for creating coatings were varied. The second is the change in the amount of plasma-forming nitrogen at constant distances of deposition of powder material and the value of the applied current.

Then, at the third stage, for certain constant values of the spraying distance of the powder material and the flow rates of the plasma-forming gas-nitrogen, we changed the values of the supplied current. For NiCrAlTiTa, the obtained sublayer regimes (arc current of the plasma torch - 550 A, speed when moving the base  $V_{tr.} = 300$  mm / s, consumption of nitrogen forming plasma - 45 l / min, distance for coating formation - 100 mm, fractional composition of the powder material - 40-63 microns, consumption of powder material - 4.0 kg/h) formed by the coating with CMM - 85%. For Mo - sublayer (arc current of the plasma torch - 600 A, speed when moving the base  $V_{sub.}=300$  mm / s, consumption of nitrogen forming plasma - 50 l / min, distance for coating formation - 110 mm, fractional composition of the powder material - 40-63 microns, powder material consumption - 4.0 kg/h) formed by the coating with CMM - 80%.

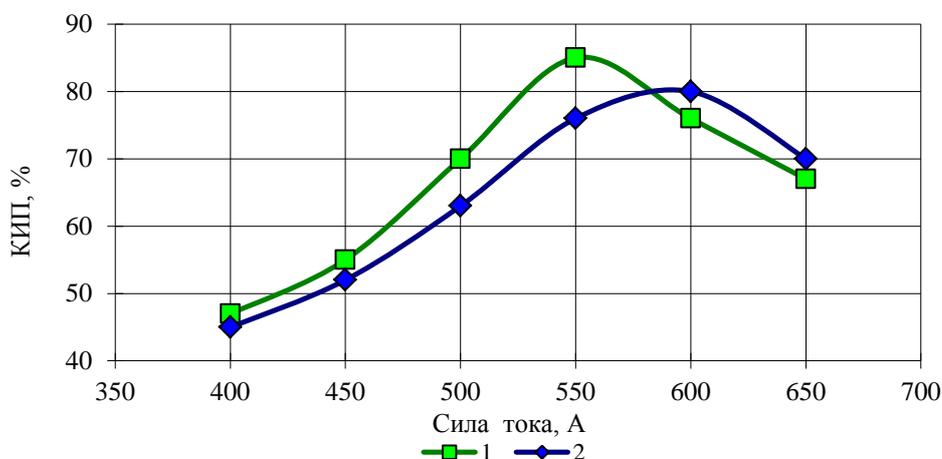


Figure 1. Influence on the parameters of the instrumentation,% of the values of the input current of the plasma torch (I, A) for the powder materials of the sublayers: 1 - NiCrAlTiTa and 2 - Mo; 1 - ( $R_{por.}=4.0$  kg/h, powder fraction 40...63  $\mu$ m,  $R_N=45$  l/min;  $L=100$  mm); 2 - ( $R_{por.}=4.0$ kg/h, powder fraction 40...63  $\mu$ m,  $R_N=50$  l/min;  $L=110$  mm)

For NiCrAlTiTa-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> - a wear-resistant layer (arc current of a plasma torch - 550 A, speed when moving the warp  $V_{sub.}=300$  mm/s, flow rate of plasma-forming nitrogen - 50 l/min, distance for coating formation - 110 mm, fractional composition of the powder material - 40-63 microns, powder material consumption - 4.0 kg/h) formed by the coating with CMM - 80%. For Mo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> - a wear-resistant layer (arc current of a plasma torch - 600 A, speed when moving the base  $V_{sub.} = 250$  mm / s, consumption of nitrogen forming plasma - 55 l / min, distance for coating formation - 130 mm, fractional composition of the

powder material - 40-63 microns, consumption of powder material - 4.5 kg / h) formed under-coating with CMM - 72%. At the specified values of technological parameters, a microheterogeneous structure of the deposited coating is formed, containing elements that ensure its wear resistance (Cr1.12Ni2.88,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, orthorhombic phase of titanium oxide TiO<sub>2</sub>, Mo compounds).

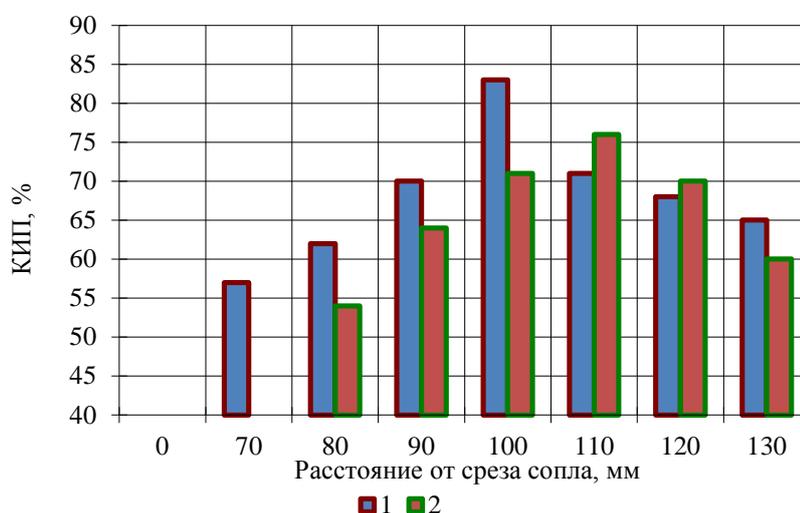


Figure 2. Influence on the performance of instrumentation, % of the coating formation distance L, mm for materials of intermediate sublayers: 1 - NiCrAlTi and 2 - Mo, 1 - (R por.=4.5 kg/h, powder fraction 40... 63  $\mu$ m, R<sub>N</sub>=45 l/min, I=550 A); 2 - (R por.=4.5 kg/h, powder fraction 40...63  $\mu$ m, R<sub>N</sub>=50 l/min; I=550 A)

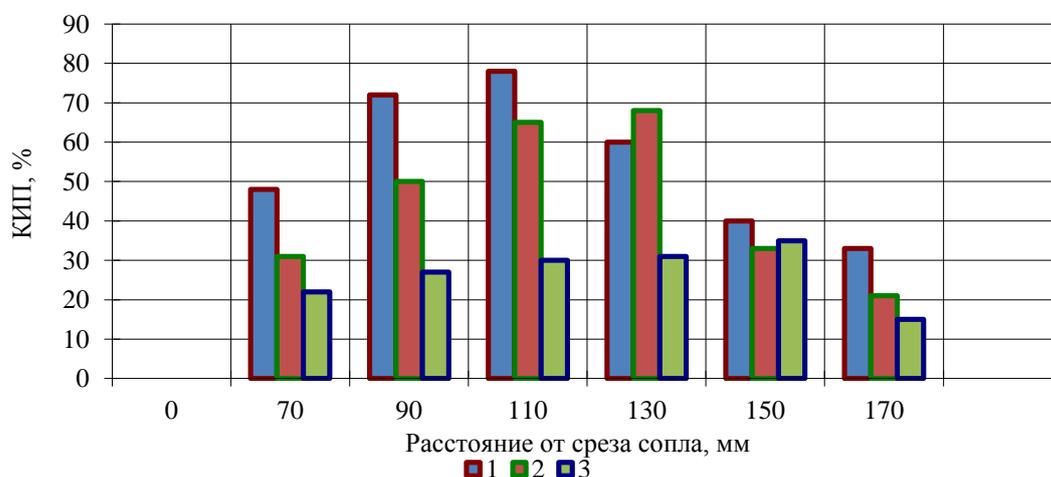


Figure 3. Influence on the parameters of instrumentation, % of the coating formation distance L, mm for powder materials of wear-resistant layers: 1 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-NiCrAlTi (fraction 40...63  $\mu$ m; I=500 A, R<sub>N</sub>=45 l/min, R then = 4.5 kg / hour); 2 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-Mo (fraction 40...63  $\mu$ m; I=600 A, R<sub>N</sub>=50 l/min, Rpor=4.5 kg/h); 3 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-Mo (fractional composition - 63...100 microns)

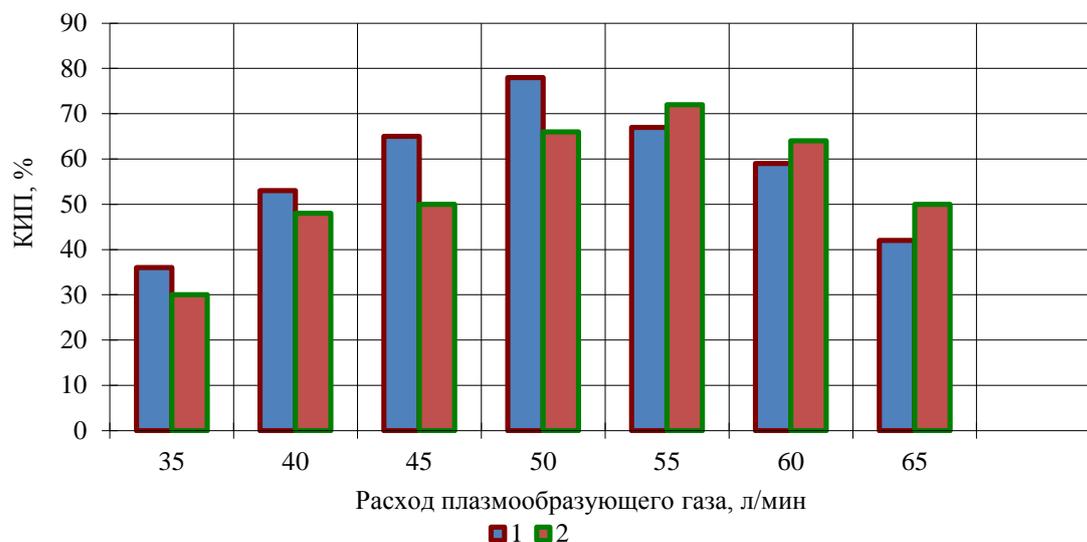


Figure 4. Influence of KPI indicators, % on the consumption of nitrogen forming plasma for powders of wear-resistant layers: 1 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-NiCrAlITa (L=110 mm; I=500 A); 2 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-Mo (L=130 mm; I=600 A) with a fraction of 40...63 μm; powder consumption - 4.5 kg/hour)

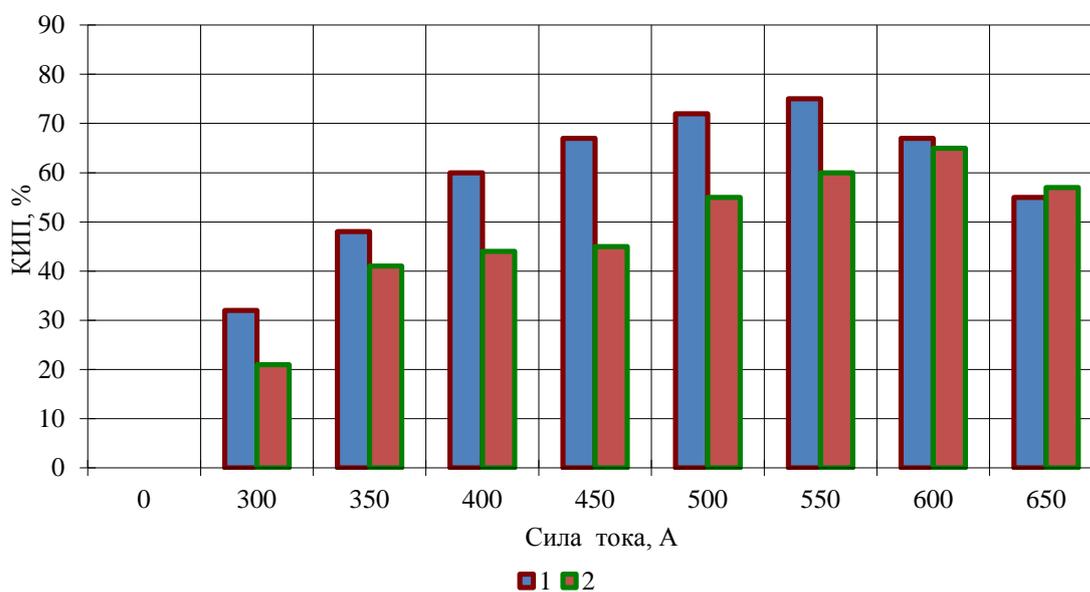


Figure 5. Influence of KPI indicators, % on the values of the plasma torch input current for powder materials of wear-resistant layers: 1 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-NiCrAlITa (L=110 mm; RN=50 l/min); 2 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-Mo (L=130 mm; RN=55 l/min), R<sub>por</sub>=4.5 kg/h; fraction 40...63 microns

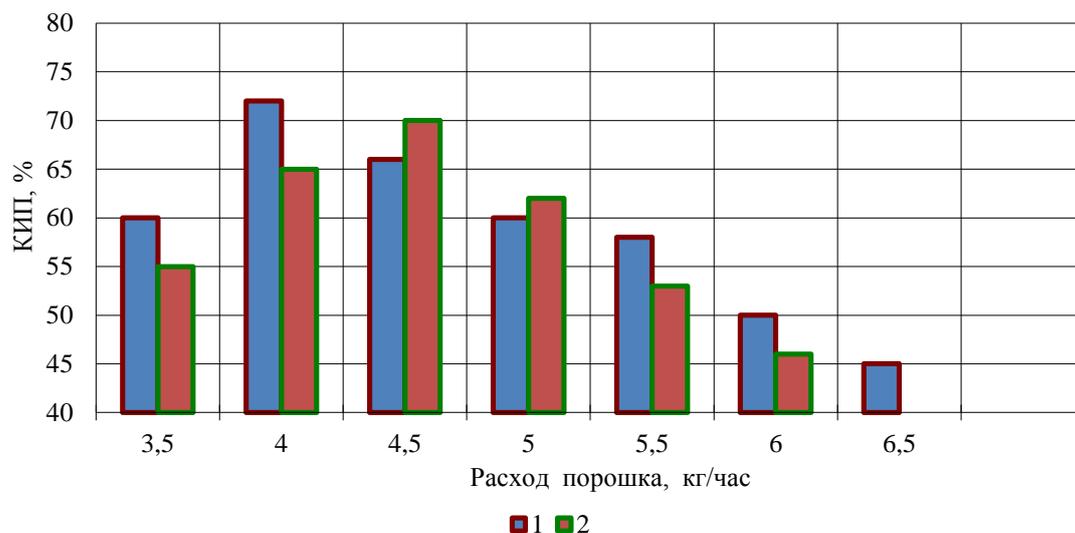


Figure 6. Influence of instrumentation indicators, % on the consumption of powder material for the formation of wear-resistant layers: 1 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-NiCrAlITa (L=110 mm; I=500 A); 2 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-Mo (L=130 mm; R<sub>N</sub>=55 l/min) with a fraction of 40...63 μm



Figure 7. Influence of KPI indicators, % on the speed when moving bases for powder materials of wear-resistant layers: 1 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-NiCrAlITa (L=110 mm; I=500 A; R<sub>por</sub>=4.5 kg/h); 2 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-Mo (L=130 mm; I=600 A; R<sub>por</sub>=4.5 kg/h) with a fraction of 40...63 μm

### 3. Conclusion

Optimum parameters for deposition of plasma coatings based on MCrAlYTa alloys reinforced with refractory ceramic oxides are chosen. At the optimal conditions for NiCrAlITa (the flow rate of the plasma-forming gas (nitrogen) is 50 l/min, the arc current of the plasma torch is 550A, the distance from the nozzle exit to the base is 100 mm, the fractional composition of the powder material is 40-63 microns, the flow rate of the powder material - 4.0 kg/h, relative speed of the substrate  $V_p=300$  mm/s) coatings with CMM - 85% are formed. For NiCrAlITa-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> (consumption of plasma-forming gas (nitrogen) - 50 l/min, plasma-tron arc current - 550 A, distance from the nozzle exit to the base - 110 mm, fractional composition of the powder material - 40-63 microns, powder material consumption - 4.0 kg/h, the relative speed of the substrate  $V_p=300$  mm/s) coatings with CMM - 80% were obtained.

In addition to chemical and mechanical bonds, there are some metallurgical bonds. At the specified values of technological parameters, a microheterogeneous structure of the sprayed coating is formed, containing elements that ensure its wear resistance (Cr<sub>1.12</sub>Ni<sub>2.88</sub>,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, orthorhombic phase of titanium oxide TiO<sub>2</sub>). In this case, the spreading of the molten particles on the substrate is achieved, there is no splashing and no losses upon impact with the substrate.

### LITERATURE:

1 Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with the inclusion of solid lubricants / V. Okovity // Welding production - M., 2002. - No. 6. - P. 41-43.

2 Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ V. Okovity // J. Welding International, 2003.- vol.16, - No. 11.- P. 918-920.

3 Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V. A. Okovity [et al.] // High Temperature Material Processes, 2014. - No. 18, - P. 45-62

4 Okovity, V. A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / V. A. Okovity, A. F. Panteleenko // Processing of metals. - Novosibirsk, 2015. - No. 67. - P. 46-54.

5 Okovity, V. A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / V. A. Okovity [et al.] // Science and Technology BNTU. - Minsk, - 2018. Issue 3. - P. 183-189.

6 Theory and practice of applying protective coatings / P. A. Vityaz [et al.] - Minsk, 1998.

7 Vityaz, P. A. Basics of application of wear-resistant, corrosion-resistant and heat-protective coatings / P. A. Vityaz, A. F. Ilyuschenko, A. I. Shevtsov. - Minsk, 2006.- P. 205-243, 280-300, 314-351.

8 Ilyuschenko, A. F. Plasma coatings based on ceramic materials / A. F. Ilyuschenko, V. A. Okovity, A. I. Shevtsov // Besprint. - Minsk, 2006.- 316 p.

9 Obtaining and research of elements of screen anti-meteor protection based on multi-layer composite plasma coatings NiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / V. M. Astashinsky [et al.] // 15th Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer: Proceedings of the International Forum, Minsk, May 23-26, 2016 / ITMO; editor: O. G. Penyazkov. - Minsk, 2016. - S. 40-44.

10 Formation of gas-thermal coatings: theory and practice / A. F. Ilyushchenko [i dr.]. - Minsk: Besprint, 2002. - 480 p.

11 Heat-shielding coatings based on ZrO<sub>2</sub>/ A. F. Ilyushchenko [i dr.]. - Minsk: Remika, 1998. - 128 p.

12 Dostanko, A. P. Processes of plasma coating: theory and practice / A. P. Dostanko, A. F. Ilyushchenko, S. P. Kundas. - Minsk.: Armita - Marketing, Management, 1999. - 436 p.

13 Ivashko, V. S. Modern technologies for applying heat-shielding ceramic coatings / V. S. Ivashko, A. F. Ilyushchenko, V. A. Okovity // Proceedings of the Belarusian Engineering Academy. - 1997. No. 2(4). - S. 28-32.

14 Technological features of the formation of heat-shielding coatings based on zirconium dioxide / V.V. Okovity [i dr.]. // Science and technology, BNTU. - 2016. - Issue. 3. - S.193-199.

15 Formation and study of multilayer composite oxide plasma coatings on the elements of screen anti-meteor protection / V. A. Okovity [and others] // Science and technology, BNTU. - 2016. - Issue. 4. - S. 270-276.

16 Development of technology for applying plasma composite coatings based on zirconium dioxide for spacecraft systems / F. I. Panteleenko [et al.] // Science and technology, BNTU. - Minsk, 2015. - Issue. 3. - S.5-9.

17. Liang Zhou. Microwave dielectric properties of low-energy plasma-coated NiCrAlY / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite /Liang Zhou Wancheng Zhou, Fa Luo, Jinbu Su, Dongmei Zhu, Yanli //Dong Surf. Coat. Technol.-2015.- P. 69-85.

18. Nicola Bowler, IEEE Trans. Dielectr. electr. Insul. 13.-2006. - P. 703-707.

19 G. Bolelli. Thermal protective properties of the gradient ceramic coating NiCrAlY / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are made by plasma spraying and spraying of a suspension/ G. Bolelli, A. Candelini//Wear 344-345.-2015. P. 69–85.

Поступила в редколлегию 16.02.2024 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Азарова Н. В., Мамолат А. Г., Поезд С. А., Цокур В. П.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПРАВКИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ.....	3
<b>Акула И. П., Чекан Н. М., Овчинников Е. В.</b> МОРФОЛОГИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ РЕФРАКТОРНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	9
<b>Бахадиров Г. А., Цой Г. Н., Набиев А. М., Сахыбаев Р. Т.</b> МАШИНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ УПРУГОВЯЗКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	16
<b>Бохонский А. И., Варминская Н. И.</b> ДВА ТИПА КОНСТРУИРУЕМЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ УПРУГИХ ОБЪЕКТОВ.....	23
<b>Брешев В. Е., Долженко Ю. С.</b> ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШПИНДЕЛЯ НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКАХ.....	31
<b>Ермишкин В. А., Минина Н. А., Палий Н. А.</b> АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТ ПАРАМЕТРА СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ.....	41
<b>Лебедев В. А., Котенко О. Н.</b> МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ДОПУСКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА ИЗДЕЛИЯ.....	49
<b>Линьков И. С., Симонов А. И.</b> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ (НА ПРИМЕРЕ СМАЗКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИИЗОБУТИЛЕНА).....	55
<b>Чигринова В. М.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ.....	60
<b>Шишкарев М. П.</b> ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С БИФУНКЦИОНАЛЬНЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ.....	68
<b>Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Okovity V. V., Litvinko A. A., Sereda V. Yu., Astashinsky V. M.</b> PARAMETERS OF DEPOSITION OF MULTILAYER PLASMA COATINGS FROM MATERIALS BASED ON M-CROLL.....	76

**ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ**

<b>Азарова Н. В.</b>	<b>3</b>
<b>Акула И. П.</b>	<b>9</b>
<b>Бахадиров Г. А.</b>	<b>16</b>
<b>Бохонский А. И.</b>	<b>23</b>
<b>Брешев В. Е.</b>	<b>31</b>
<b>Варминская Н. И.</b>	<b>23</b>
<b>Долженко Ю. С.</b>	<b>31</b>
<b>Ермишкин В. А.</b>	<b>41</b>
<b>Котенко О. Н.</b>	<b>49</b>
<b>Лебедев В. А.</b>	<b>49</b>
<b>Линьков И. С.</b>	<b>55</b>
<b>Мамолат А. Г.</b>	<b>3</b>
<b>Минина Н. А.</b>	<b>41</b>
<b>Набиев А. М.</b>	<b>16</b>
<b>Овчинников Е. В.</b>	<b>9</b>
<b>Палий Н. А.</b>	<b>41</b>
<b>Поезд С. А.</b>	<b>3</b>
<b>Сахыбаев Р. Т.</b>	<b>16</b>
<b>Симонов А. И.</b>	<b>55</b>
<b>Цой Г. Н.</b>	<b>16</b>
<b>Цокур В. П.</b>	<b>3</b>
<b>Чекан Н. М.</b>	<b>9</b>
<b>Чигринова В. М.</b>	<b>60</b>
<b>Шишкарев М. П.</b>	<b>68</b>
<b>Astashinsky V. M.</b>	<b>76</b>
<b>Devoino O. G.</b>	<b>76</b>
<b>Litvinko A. A.</b>	<b>76</b>
<b>Okovity V. A.</b>	<b>76</b>
<b>Okovity V. V.</b>	<b>76</b>
<b>Panteleenko F. I.</b>	<b>76</b>
<b>Sereda V. Yu.</b>	<b>76</b>
<b>Sidoriv V. A.</b>	<b>76</b>

## 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 35 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.ru>, а также размещен на сайте кафедры «Технология машиностроения» ДонНТУ, г. Донецк: <http://tm.donntu.ru>

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 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.ru](mailto:tm@fimm.donntu.ru) 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, заключе-

ние 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, максимально 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.; 2022 (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: +7-856- 301-08-40.

Е-mail: [tm@fimm.donntu.ru](mailto:tm@fimm.donntu.ru) 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: +7 (856) 3050104; E-mail: [tm@fimm.donntu.ru](mailto:tm@fimm.donntu.ru) (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 SYNTHESIS 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.; 2022 (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 //Наукоемкие технологии в машиностроении: ежемесячный научно-

технический и производственный 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 (85)' 2024**

Главный редактор  
*д-р техн. наук, проф. А. Н. Михайлов*  
E-mail: [tm@fimm.donntu.ru](mailto:tm@fimm.donntu.ru)  
*Технический редактор Д. О. Киселица*

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: Россия, ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ФГБОУ ВО «ДонНТУ»,  
тел. +7 (856) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: Россия, ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел.+ 7 (949) 306-08-79,  
+7 (856) 301-08-05. E-mail: [tm@fimm.donntu.ru](mailto:tm@fimm.donntu.ru). Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

Подписано к печати 20.02.2024 г.  
Формат 60x84<sup>1/16</sup>. Бумага Maestro.  
Гарнитура «Times New Roman». Печать лазерная.  
Усл. печ. л. 5,41. Уч.-изд. л. 6,69. Тираж 300 экз.

Отпечатано в рекламно-издательском отделе учредителя  
РИО «Донецкая политехника»  
Адрес: г. Донецк, ул. Артема, 58  
Тел.: +7 (856) 301-09-67