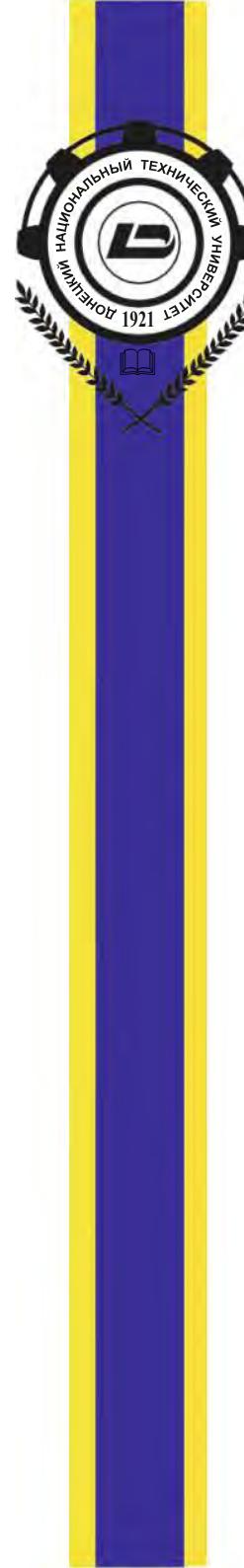


Вып. 1 (88)' 2025

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ



ДОНЕЦКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И  
СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Международный  
сборник научных трудов

Вып. 1 (88)' 2025



ДОНЕЦК - 2025

ISSN 2073-3216  
(E) ISSN 2518-7120

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«Донецкий национальный технический университет»**

# **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Международный сборник научных трудов

Выпуск 1(88)' 2025

Донецк  
2025

УДК 621.01(063)

ББК 34.4

П78

Рекомендовано к изданию  
Ученым советом ФГБОУ ВО «ДонНТУ»  
(протокол № 5 от 30.05.2025 г.)

**Ответственный редактор – Михайлов Александр Николаевич**

**Редакционная коллегия:**

Михайлов А. Н. (председатель), Горобец И. А., Лахин А. М., Баласанян Б. С.,  
Бахадиров Г. А., Брешев В. Е., Бутенко В. И., Витренко В. А.,  
Мазуру С., Овчинников Е. В., Пантеленко Ф. И., Поветкин В. В.,  
Суслов А. Г., Тока А., Хандожко А. В.

**Прогрессивные технологии и системы машиностроения :**

**П78** междунар. сб. науч. трудов / Ред. кол.: Михайлов А. Н. (пред.),  
Горобец И. А., Лахин А. М. [и др.]; отв. ред. А. Н. Михайлов. –  
Донецк : ДонНТУ, 2025. – Систем. требования : просмотрщик PDF-  
файлов. – Загл. с титул. экрана.

В международном сборнике приведены вопросы теории и практики обработки изделий прогрессивными методами, показаны достижения и направления развития технологического оборудования, оснастки, металорежущего инструмента и нанесения специальных покрытий на изделия машиностроения. Рассмотрены аспекты автоматизации производственных процессов и надежности технологического оборудования, а также освещены современные проблемы материаловедения в машиностроении.

В издании публикуются труды ученых и ведущих специалистов из разных стран, сборник предназначен для научно-технических работников, ИТР и специалистов в области машиностроения.

Тексты трудов печатаются в авторской редакции.

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

УДК 621.01(063)  
ББК 34.4

© ФГБОУВО «ДонНТУ», 2025

**Н. М. Антонова, д-р техн. наук, проф., А. И. Симонов, В. В. Василевич**

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И.

Платова, г. Новочеркасск, Россия

Тел./Факс: +7 863 6579086; E-mail: [melnik1@rambler.ru](mailto:melnik1@rambler.ru)

## АДГЕЗИЯ И МОРФОЛОГИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИИЗОБУТИЛЕНА

*В работе предложено разделительное покрытие на основе полизобутилена для защиты металлической оснастки. Выявлено влияние на адгезию покрытий содержания полизобутилена, температуры и времени полимеризации покрытий. Получено уравнение регрессии, связывающее адгезию с составом и условиями формирования покрытий. С помощью разработанного программного обеспечения произведен расчет оптимальных условий, обеспечивающих наиболее высокую прочность сцепления покрытия с защищаемой поверхностью. Результаты расчета подтверждены экспериментально. Методами микроскопии показано, что сформированное покрытие обладает сравнительно однородной бездефектной структурой и является гидрофобным. Установлено, что покрытие термически устойчиво при температурах менее 420 °C.*

**Ключевые слова:** покрытие, полизобутилен, адгезия, морфология, гидрофобность, термодеструкция.

**N. M. Antonova, A. I. Simonov, V. V. Vasilevich**

### ADHESION AND MORPHOLOGY OF POLYISOBUTYLENE-BASED SEPARATION COATING

*The paper proposes a separation coating based on polyisobutylene to protect metal tooling. The effect of the polyisobutylene content, temperature, and polymerization time on the adhesion of coatings has been revealed. A regression equation is obtained that relates adhesion to the composition and conditions of coating formation. With the help of the developed software, optimal conditions were calculated that ensure the highest adhesion strength of the coating to the protected surface. The calculation results have been confirmed experimentally. Microscopy has shown that the formed coating has a relatively homogeneous defect-free structure and is hydrophobic. It has been established that the coating is thermally stable at temperatures below 420 °C.*

**Keywords:** coating, polyisobutylene, adhesion, morphology, hydrophobicity, thermal degradation.

### 1. Введение

Существует широкий спектр разделительных полимерных покрытий, предназначенных для защиты металлических поверхностей при формовке резинотехнических, полимерных и композиционных изделий. В промышленности востребованы антиадгезионные смазки на основе синтетических каучуков. Как правило, такие покрытия изготавливаются из исходных жидких растворов полимеров, для которых характерна нестабильность реологических характеристик. Возрастание вязкости полимерных растворов, например, смазок серии Пента-100 [1] приводит к формированию покрытий неоднородных по толщине, появлению наплывов, потеков, сморщиванию и как следствие, низкой адгезии и снижению функциональных свойств. Поэтому получение реологически стабильного полимерного раствора для формирования защитных покрытий с высокими механическими и функциональными свойствами является актуальной задачей. Анализ доступных отечественных и зарубежных источников свидетельствует, что высокой релаксационной стойкостью обладают растворы полизобутилена (ПИБ) [2-4]. ПИБ достаточно известный полимер, синтез его изучен, современные исследования направлены преимущественно на применение полимера как модификатора, клеевого компонента [5, 6], добавки, повышающей адгезию [7]. Однако работ, касающихся

использования полимера без добавок, в качестве разделительного покрытия, практически нет. Проведенные авторами предварительные исследования показали, что ПИБ образует тонкую прочную защитную пленку на металлических поверхностях, будучи растворенным в углеводородах. Обладая химической инертностью к агрессивным средам, водостойкостью-полимер представляет интерес, как защитное покрытие для металлических поверхностей.

Цель данной работы – получить гидрофобное покрытие на основе полизобутилена с высокой адгезией к поверхности металла.

## 2. Материалы и методы исследования

В работе растворителем для полизобутилена П-200 служил нефрас С 50/170. Изготовленный раствор наносили на обезжиренные стальные пластинки (40Х) размерами 150x70 мм, в два слоя, с сушкой каждого слоя 15 минут на воздухе. Затем образцы с покрытиями выдерживали в термошкафах в соответствии с планом эксперимента. Использовали математическое планирование эксперимента, расширенный полный факторный эксперимент. Число счетных испытаний для каждой точки плана составляло не менее пяти. Исследовали влияние на адгезию содержания ПИБ (мас. %) в растворителе, температуры ( $T$ , ° С) и времени ( $\tau$ , мин) формирования покрытия. Диапазоны изменения факторов в натуральном и безразмерном масштабе приведены в таблице 1. Адгезию определяли по ГОСТ 31149-2014, методом решетчатых надрезов. Морфология покрытий изучалась с помощью микроскопа для металлографии ADFU300 КТИ (филиала) ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова. Гидрофобность покрытий определяли, измеряя краевой угол смачивания ( $\theta$ , °) покрытий дистиллированной водой, методом лежащей капли, с помощью ранее разработанной установки [1]. Дифференциальную сканирующую калориметрию образцов выполняли с помощью калориметра DSC-1. Образцы изучали в интервале температур 30-500 °C, при скорости нагревания образца 20 °C·мин<sup>-1</sup> в алюминиевом стандартном тигле.

Таблица 1. Диапазоны варьирования исследуемых факторов в эксперименте

Факторы	ПИБ, %	$T$ , ° С	$\tau$ , мин
	Масштаб натуральный (безразмерный)		
	$z_1 (x_1)$	$z_2 (x_2)$	$z_3 (x_3)$
Область исследования	1,0–3,0 (-1,4; +1,4)	60,0–100,0 (-1,4; +1,4)	240–360 (-1,4; +1,4)
Центр области исследования	2,0 (0)	80,0 (0)	300 (0)

## 3. Результаты и обсуждение

После статистической обработки результатов экспериментов было получено уравнение регрессии, связывающее величину адгезии ( $Y_A$ ) покрытий с исследуемыми факторами в безразмерном масштабе:

$$Y_A = 1,85 - 0,37 \cdot x_2 + 0,49 \cdot x_3 - 0,63 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,62 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Значимость коэффициентов оценивалась по критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05, адекватность -по критерию Фишера, расчетные и табличные критерия Фишера составили 3,0 и 8,6 соответственно. Кривые зависимости адгезии от исследуемых факторов показаны на рисунке 1.

Метод решетчатых надрезов позволяет оценить адгезию по шестибалльной шкале, где «нуль баллов» - наилучшая адгезия покрытия. На рисунке 1 кривые под номером (1) соответствуют зависимостям адгезии от исследуемого фактора при фиксации двух остальных на верхних границах плана эксперимента, кривые (2) – в центре плана и кривые (3) -на нижних границах плана эксперимента, соответственно. Из приведенных зависимостей видно, что в центре плана эксперимента увеличение содержания ПИБ в растворе (рис. 1 а) не влияет на прочность сцепления покрытия с подложкой (менее 2 баллов), на верхних границах – приводит к ухудшению до 4-5 баллов, на нижних границах – улучшает до 2 баллов. Реализовать высокую адгезию «0-1 балл» позволяет правильный выбор температурно-временных условий формирования разделительных покрытий. В интервале температур отверждения покрытия 60,0–80,0 ° С на границах исследуемых диапазонов адгезия высока и составляет «0 баллов» (рис. 1 б, кривые 1 и 3), увеличение температуры от 60 ° С до 100,0° С ухудшает адгезию от 1 до 2 баллов при фиксации остальных переменных в центре плана (рис. 1 б, кривая 2). Для времени полимеризации (рис. 1 в) покрытий 240-260 минут и максимальных содержаний ПИБ и значениях температуры термостатирования она высока – «0 баллов», в остальных случаях ухудшается до 3 баллов.

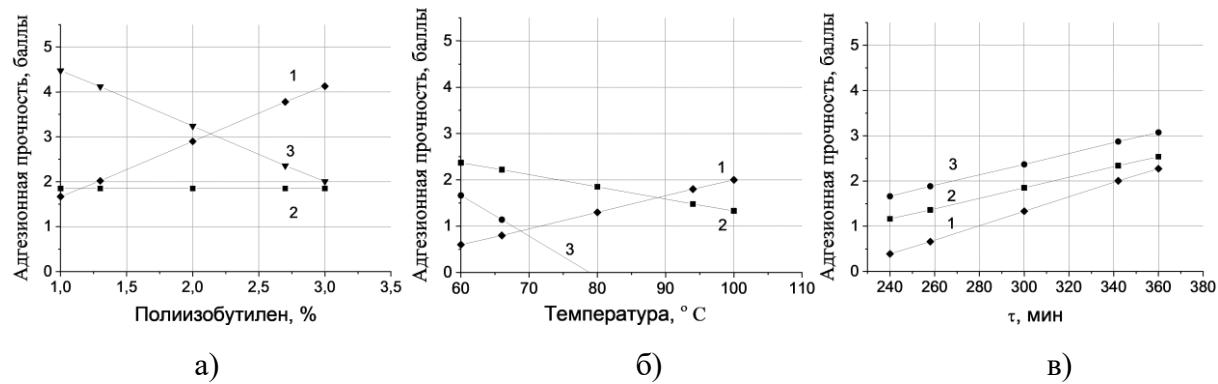


Рисунок 1. Влияние на адгезию покрытий: а–содержания ПИБ в растворе нефраса; б– температуры; в–времени формирования покрытия

В настоящее время существует довольно много подходов, позволяющих решать задачи оптимизации. С помощью платных программных продуктов, например, «PlanExp B-D13», можно определить экстремумы. В данной работе, помимо экстремумов требовалось найти «удобные», с точки зрения технологических режимов изготовления покрытий решения, поэтому было разработана программа на языке программирования C++, в среде Microsoft Visual Studio, позволяющая по заданному пользователем значению адгезии покрытий рассчитать комбинацию факторов: «содержание полимера-температура-время формирования покрытия», соответствующую этому значению. Программа позволяет рассчитать ряд таких комбинаций и выбрать наиболее целесообразную. На рисунке 2 представлена блок-схема программы. Здесь «b»-коэффициенты перед переменными в уравнении регрессии.

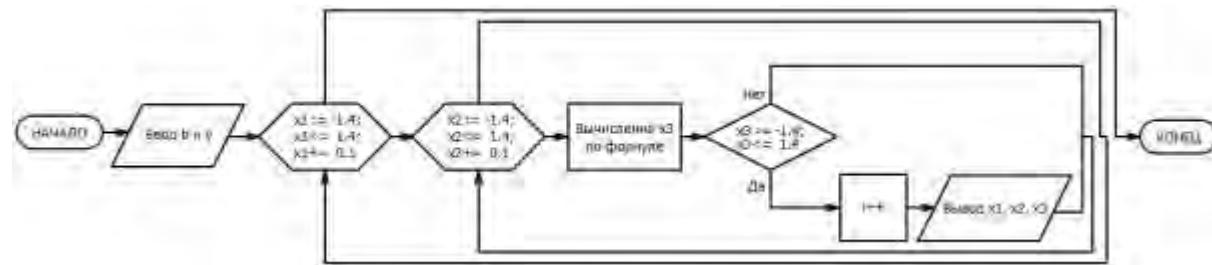


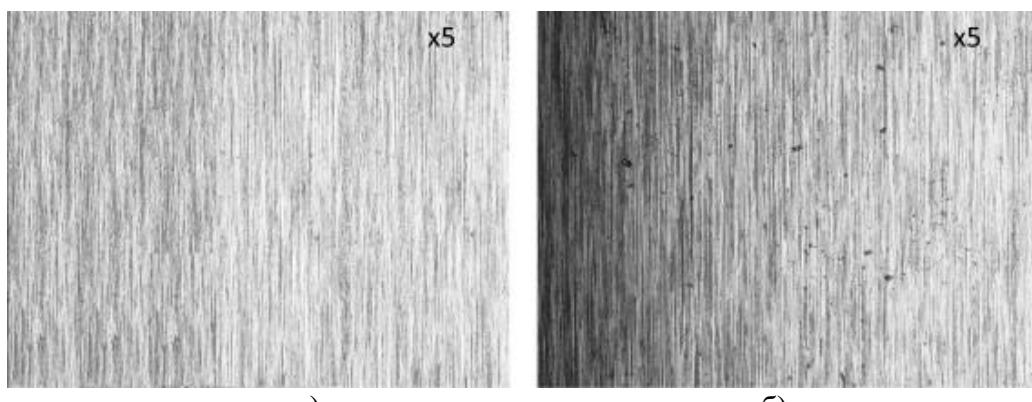
Рисунок 2. Блок-схема программы для расчета комбинаций факторов, обеспечивающих заданную адгезию ПИБ-покрытий

Программа выдает более 100 возможных комбинаций для фиксированного значения адгезии  $Y_A=0$ . Поскольку авторы стремились придать программному модулю универсальность, расчет производится для комбинаций безразмерных переменных, с возможностью далее использовать модуль для анализа произвольных механических характеристик материалов. После анализа результатов проведенного расчета были определены комбинации факторов, обеспечивающие высокую адгезию покрытий в «нуль баллов» (таблица 2) и наихудшую «пять баллов».

Таблица 2. Сочетания факторов, обеспечивающие адгезию «0 баллов»

№ состава	ПИБ, %	$T, {}^\circ\text{C}$	$\tau, \text{мин}$	Адгезия, баллы	
				Расчет	Эксперимент
1	1,1	90,0	261	0	0
2	1,2	86,0	251	0	0
3	1,2	93,0	264	0	0
4	3,0	100	360	4	5

В соответствии с результатами расчетов были изготовлены образцы с покрытиями. На рисунке 3 в качестве примера показаны изображения поверхности образцов с покрытиями, изготовленными в соответствии с таблицей 2: состав 2 (высокая адгезия) и состав 4 (низкая адгезия).



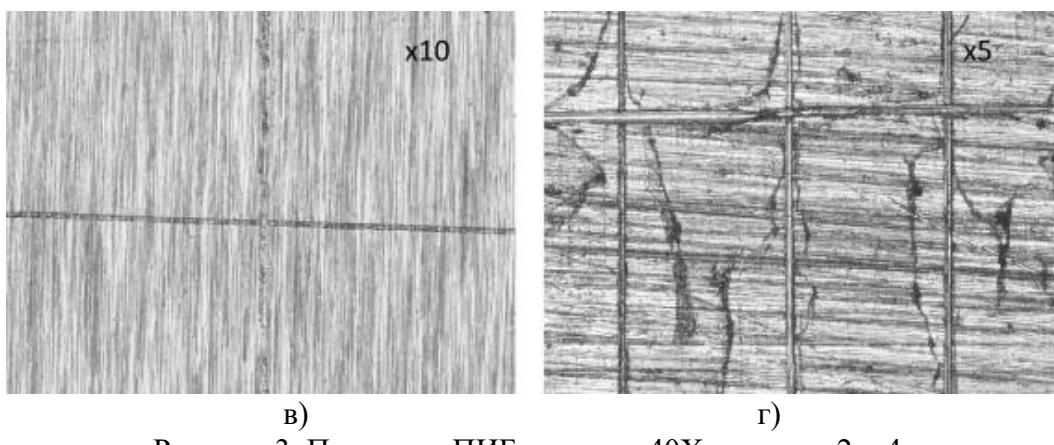


Рисунок 3. Покрытие ПИБ на стали 40Х, составы 2 и 4:  
а, б – исходное состояние; в, г – после нанесения надрезов

Покрытие (состав 2) обладает визуально однородной структурой, без наплывов и пор. Это объясняется тем, что при меньшей концентрации полимера в нефрасе на поверхности металла образуется тонкая пленка: пузырьки воздуха, пары растворителя успевают испариться в процессе сушки покрытия, и как следствие, образуется морфологически однородная поверхность (рис. 3 а). Края надрезов чистые, отслоений не наблюдается (рис. 3 в). При содержании ПИБ близкому к максимальному, толщина пленки возрастает, на поверхности защитной пленки образуются наплывы, поры (как тупиковые, так и открытые), возникают зоны сморщивания, покрытие отслаивается, адгезия резко уменьшается (рис. 3 б, г). Связано это с повышением вязкости исходного раствора ПИБ, приводящей к увеличению поверхностного натяжения состава, возникновению неровностей пленки по толщине, образованию кратеров, появлению пор. Уменьшение адгезии пленок ПИБ к поверхностям при возрастании поверхностного натяжения исходных растворов было показано в работе [2]. Наилучшая адгезия покрытий реализуется при сочетании факторов: содержание (в растворителе-нефрасе) ПИБ=1,1-1,2 %,  $T=86,0-93,0$  °С,  $\tau=251-264$  мин.

Для разделительных систем важной характеристикой покрытий является их гидрофобность. В таблице 3 приведены результаты измерений краевого угла смачивания различных поверхностей дистиллированной водой. Из таблицы 2 видно, что пленка ПИБ обладает гидрофобными свойствами, необходимыми для защиты металлической поверхности от влаги.

Таблица 3. Результаты измерения краевого угла смачивания поверхности образцов водой

Поверхность образца	$\theta, ^\circ$
Фторопласт Ф-32	80
Сталь 40Х	75
Сталь 40Х+ПИБ (состав 2)	86
Сталь 40Х+ПИБ (состав 4)	72

Наиболее близкими к покрытию на основе полизобутилена по свойствам являются антиадгезионные защитные покрытия «Пента» серий 107, 100, 119-1. Рекомендуемый диапазон использования этих покрытий не превышает рабочих температур  $\sim 200$

° С. Поэтому дополнительно исследовали термоустойчивость покрытия ПИБ. Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии приведены на рисунке 4.

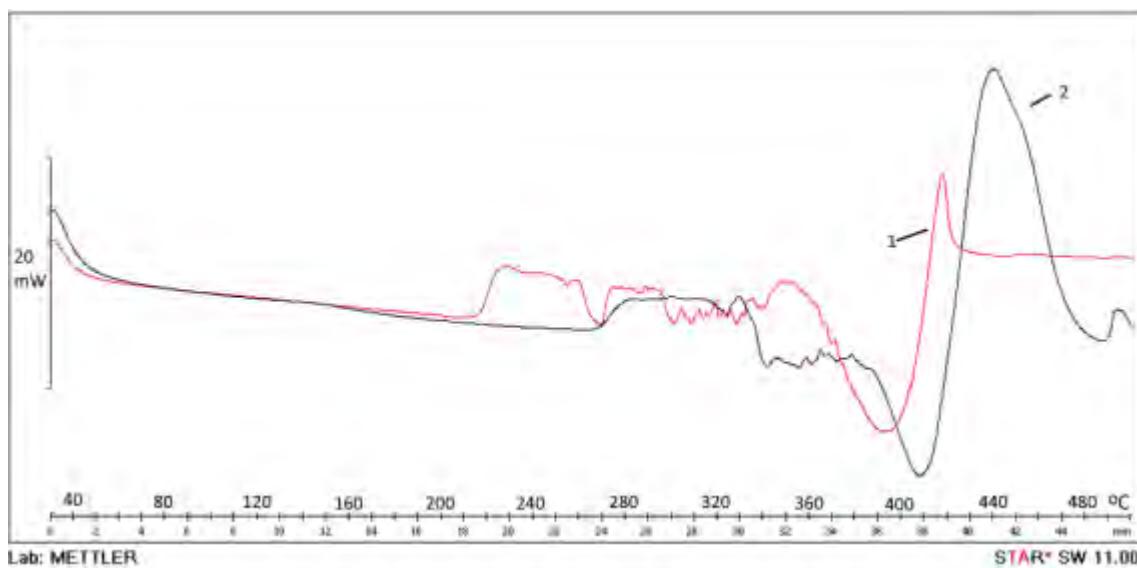


Рисунок 4. Дифференциальная сканирующая калориметрия полизобутилена: (1) – в исходном состоянии, (2) – покрытия

Сформированное покрытие более устойчиво к тепловому воздействию (начало разрушения –  $T \sim 270$  °C), чем ПИБ в исходном состоянии ( $T \sim 210$  °C). Эндотермические пики связаны с удалением воды (кривая 1,  $T = 393$  °C), воды и растворителя (кривая 2,  $T = 407$  °C). Полимер в исходном состоянии разрушается при 430 °C, покрытие при 480 °C (начало разрушения –  $T = 423$  °C, экзопику соответствует  $T = 450$  °C). Из результатов анализа видно, что покрытие на основе полизобутилена достаточно устойчиво к воздействию температур до 420 °C.

#### 4. Заключение

Разработано разделительное покрытие на основе полизобутилена для защиты металлической оснастки.

Установлено влияние на адгезию покрытий содержания полизобутилена в растворителе нефрасе, температуры и времени формирования покрытий. С помощью разработанного программного обеспечения рассчитаны диапазоны изменения содержания ПИБ, температуры и времени формирования покрытий, обеспечивающие высокую адгезию покрытий к металлу: ПИБ=1,1-1,2 %,  $T=86,0$ -93,0 °C,  $\tau=251$ -264 мин.

Методами оптической микроскопии показано, что для рассчитанных оптимальных соотношений на металлических поверхностях формируется бездефектное защитное покрытие. Выявлено, что покрытие на основе полизобутилена обладает высокими гидрофобными свойствами, краевой угол смачивания покрытия водой составляет 86°. Методами дифференциальной сканирующей калориметрии показано, что покрытие термически устойчиво до 420 °C.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Симонов, А. И. Устройство для определения краевого угла смачивания жидкостей на плоских поверхностях / А. И. Симонов, Н. М. Антонова // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 11(119). – С. 780-790.
2. Линьков, И. С. Прогнозирование адгезионной прочности покрытий (на примере смазки на основе полиизобутилена) / И. С. Линьков, А. И. Симонов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2024. – № 2(85). – С. 55-59.
3. Kang Y. et al. Adhesive and rheological properties of Polyisobutylene-based adhesives with different white carbon black fillers //International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2024. – Т. 133. – С. 103755.
4. Филатова М. В. и др. Низкомолекулярный полиизобутилен (PIB): производственно-экономическое назначение, анализ рынка //Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2024. – Т. 86. – №. 2. – С. 269-276.
5. Alves J. B. et al. A bibliometric survey on polyisobutylene manufacture //Processes. – 2021. – Т. 9. – №. 8. – С. 1315.
6. Karamdoust S. Functionalized Polyisobutylene: From Synthesis to Properties and Applications. – The University of Western Ontario (Canada), 2013.
7. Kang Y. et al. Preparation and application of polyisobutylene-based sealants: used in pilot manufacturing of watertight cables //The Journal of Adhesion. – 2025. – С. 1-15.

Поступила в редакцию 21.03.2025 г.

А. А. Башков, ассист., С. В. Иванов, инженер., А. М. Михайлов, ассист., Д. А. Рябов, ст. преп., А. А. Акулова, магистр.

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (НГТУ им. Алексеева), г. Нижний Новгород, Россия

Тел./Факс: +7(831)436-94-75; E-mail: [nntu@nntu.ru](mailto:nntu@nntu.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ И ЕГО СТРУКТУРЫ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

В статье рассмотрен процесс наростообразования при точении конструкционной углеродистой стали 50 твердосплавным режущим инструментом (ВК8) на различных режимах резания. Получены образцы нароста и проведен металлографический анализ для оценки деформационных процессов. Рассмотрены особенности процессов, протекающих в приконтактных слоях между стружкой и передней поверхностью инструмента. Дополнительно проведен спектральный анализ подошв нароста, на основании которого описан вихревой механизм изнашивания твердого сплава.

**Ключевые слова:** трение, износ, наростообразование, контактные поверхности, прирезцовий слой, лезвийная обработка.

А. А. Bashkov, S. V. Ivanov, A. M. Mikhaylov, D. A. Ryabov, A. A. Akulova

### STUDY OF THE PROCESS OF GROWTH AND ITS STRUCTURE DURING LATHE MACHINING OF STRUCTURAL STEELS

The article examines the process of buildup formation during turning of structural carbon steel 50 with a hard-alloy cutting tool (VK8) under various cutting conditions. Samples of the buildup were obtained and metallographic analysis was performed to evaluate deformation processes. The features of the processes occurring in the contact layers between the chip and the tool's rake face are considered. Additionally, spectral analysis of the buildup bases was conducted, on the basis of which a vortex wear mechanism of the hard alloy was described.

**Keywords:** friction, wear, build-up formation, contact surfaces, tool-tip layer, blade machining.

#### 1. Введение

Механическая обработка сталей твердосплавным инструментом является одной из наиболее распространенных операций в металлообработке. В настоящее время существует огромное множество марок твердых сплавов и составов износостойких покрытий [5], которые защищают режущую кромку от износа и увеличивают период стойкости режущего инструмента. Однако в определенных условиях обработки (пластичные материалы, низкие скорости, отсутствие СОЖ) на передней поверхности могут образовываться наросты – участки материала, прилипшие к режущей кромке. Это происходит из-за высоких температур и удельных давлений в приконтактных слоях, которые вызывают адгезию обрабатываемого и инструментального материалов. Наростообразование существенно влияет на процесс резания, ухудшая качество получаемых поверхностей из-за изменения геометрии режущего клина, и увеличивая износ передней поверхности инструмента, путем разрушения покрытия из-за вырыва зерен твердого сплава.

Процесс образования нароста подробно рассмотрен в трудах Боброва В. Ф. [7], Грановского Г. И. [4], но механизм наростообразования остается изученным недостаточно. Под наростом автор понимал клиновидную, неподвижную область материала обрабатываемой заготовки, расположенную у лезвия инструмента перед его передней поверхностью. На ювенильных (химически чистых) поверхностях стружки и инструмента при определенных температуре и давлении создаются условия для

адгезионного схватывания материалов стружки и инструмента. Также автор подчеркивает, что частота наростообразования составляет около 3000-4000 циклов в минуту и возрастает с увеличением скорости резания.

Нарост представляет собой слои обработанного материала, которые адгезионно закрепляются сначала на режущей кромке инструмента, а потом друг на друге. При установленном резании в прирезцовых слоях стружки возможно плавление деформированных объемов обрабатываемого материала и вихревое движение частиц. В локализованной области высокого давления (ОВД) прирезцового слоя на передней поверхности инструмента могут образовываться первичные очаги заторможивания частиц обрабатываемого материала (рис.1). Материал на образование таких пластических волн расходуется из промежуточных областей (за волной образуется впадина), причем материал может быть как обрабатываемый, превращенный в стружку, так и инструментальный.

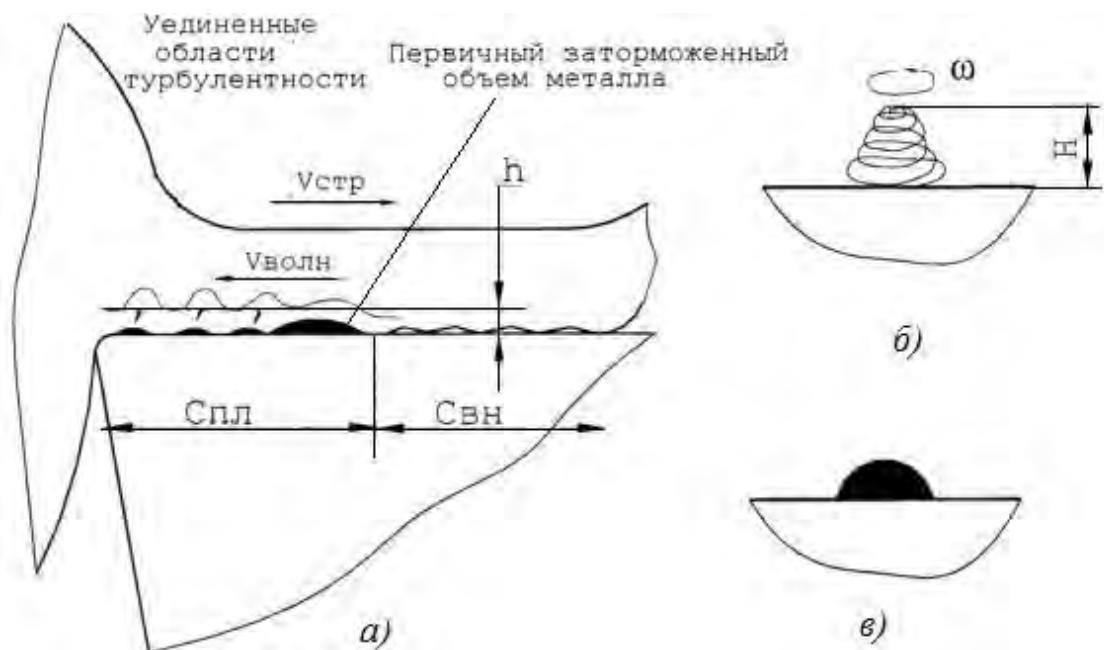


Рисунок 1. Схема образования нароста на передней поверхности инструмента: Спл – длина зоны пластического контакта, Свн – длина зоны внешнего контакта,  $h$  – толщина квазижидкого прирезцового слоя стружки,  $H$  – высота вихревого столба,  $\omega$  – угловая скорость вихря,  $V_{ст}$  – скорость стружки,  $V_{волн}$  – скорость волн.

При резании пластическое течение приконтактных слоев стружки ведет к потере устойчивости материала и созданию здесь уединенных областей турбулентности, погруженных в ламинарное течение, бегущих к режущему лезвию. Волны из квазижидкого металла прирезцового слоя формируются в основном за счет материала стружки. Если же на образование зародышей вихревой структуры используется инструментальный материал поверхного слоя резца, то будет наблюдаться унос частиц инструмента из участка ОВД, т.е. его износ.

Проблема наростообразования при обработке сталей является одной из наиболее изученных в области металорежущих процессов [1, 2]. Однако в настоящее время в связи с развитием материаловедения ученые разрабатывают современные подходы к синтезу новых материалов (с уникальными структурой и свойствами) для получения оптимальных физико-механических свойств изделий. Развитие аддитивных технологий

позволяет печатать изделия с композитной структурой из различных материалов. Для таких материалов необходимо вновь подбирать оптимальные режимы резания, покрытия, геометрию режущей части инструментов и состав смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Эти факторы подчеркивают важность более глубоко изучения механизмов структурных изменений в приконтактных слоях стружки из различных материалов в условиях высоких скоростей деформирования и нагрева, и их влияния на поверхностное разрушение твердых сплавов с применением современных методов и инструментов.

## 2. Постановка цели исследования

Для изучения структуры наростов применяются различные методы, например, металлографический [3]. Этот метод позволяет выявить химический состав наростов, микроструктурные изменения, такие как деформационные слои и зернистость материала. С помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии можно определить распределение легирующих элементов в наростах, что помогает понять природу их формирования.

На качество процесса резания главным образом влияют физико-химические процессы, протекающие в зоне обработки (в системе «инструмент-деталь»). В зоне контакта стружки с передней поверхностью возникают следующие явления: адгезия, упрочнение и разупрочнение поверхностных слоёв, диффузия, эрозия, окисление и другие [4]. Целью данного исследования является определение механизма формирования нароста и его структуры при токарной обработке конструкционной углеродистой стали 50, а также разработка методов снижения интенсивности данного процесса.

## 3. Исследуемые материалы

В качестве исследуемого обрабатываемого материала использовалась сталь 50 - сталь конструкционная углеродистая качественная (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав стали 50 (в %)

C	Si	Mn	Ni	S
0.47 - 0.55	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	до 0.3	до 0.04
P	Cr	Cu	As	
до 0.035	до 0.25	до 0.3	до 0.08	

Механические свойства: предел прочности: 700–850 МПа. Твердость после термообработки: 200–300 НВ. Пластичность: относительно низкая из-за высокого содержания углерода. Структура после термообработки: мартенсит или сорбит при закалке и отпуске. Перлитно-ферритная структура в отожженном состоянии. Перлит занимает больше половины объёма (0,53% С).

Исходная структура приведена на рис. 2.

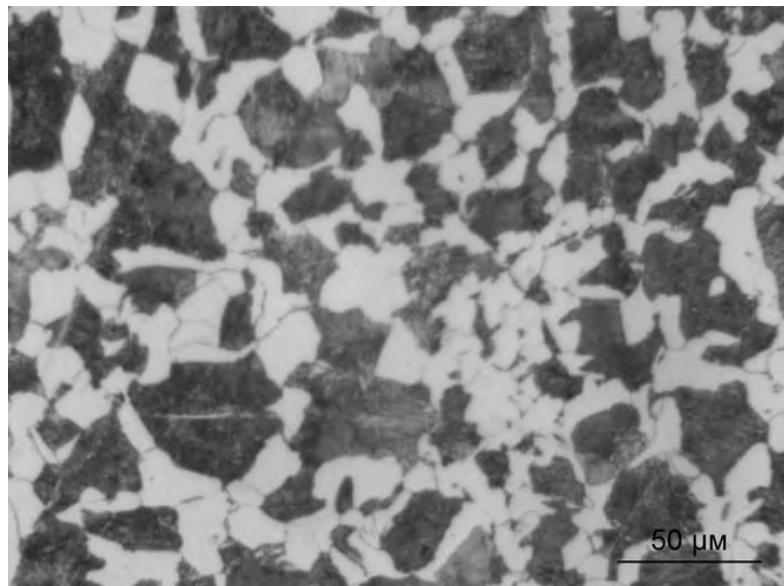


Рисунок 2. Микроструктура Ст50 в исходном состоянии

Сталь 50 относится к углеродистым конструкционным сталям средней прочности и повышенной твердости. Она широко применяется для изготовления деталей, работающих при высоких нагрузках, таких как валы, шестерни и оси. При обработке резанием сталь 50 демонстрирует ряд особенностей, обусловленных ее химическим составом, структурой и механическими свойствами. Сталь 50 обладает высокой прочностью и твердостью, что усложняет процесс обработки. Режущие инструменты подвергаются значительным нагрузкам и износу. После термической обработки твердость может превышать 250 НВ, что требует применения твердых сплавов или инструментов с покрытием.

При низких скоростях резания возможно образование наростов на режущей кромке. Это связано с высокой пластичностью стали в зоне резания и адгезией материала к инструменту. В зоне резания выделяется значительное количество тепла из-за высокой твердости и прочности материала. Это требует эффективного применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) для предотвращения перегрева инструмента и заготовки.

#### 4. Описание экспериментальной установки

Для соблюдений условия свободного резания (в процессе резания работает только главная режущая кромка) предварительно на заготовке были получены пояски шириной от 2-4 мм. В качестве режущего инструмента применялся твердосплавный резец с пластиной ВК8 (сплав вольфрамовой группы). Параметры режущей пластины: главный угол в плане  $\phi = 55^\circ$ , задний угол  $7^\circ$ , передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , радиус при вершине 0,3 мм. Способ крепления - прижим прихватом сверху.

Известно, что нарост образуется на малых скоростях резания, а также при обработке пластичных материалов [4]. Обработка с целью получения нароста выполнялась на токарно-винторезном станке 1К62 с закреплением заготовки в центрах (рис. 3).



Рисунок 3. Экспериментальная установка

Пояски срезались твердосплавным резцом с поперечной подачей на различных режимах резания в течении 2-3 секунд, чтобы нарост не успевал «свариваться» с передней поверхностью пластины. Далее резец резко отводился от заготовки для его сохранения на режущей кромке (рис.4). Обработка проводилась без применения СОЖ.

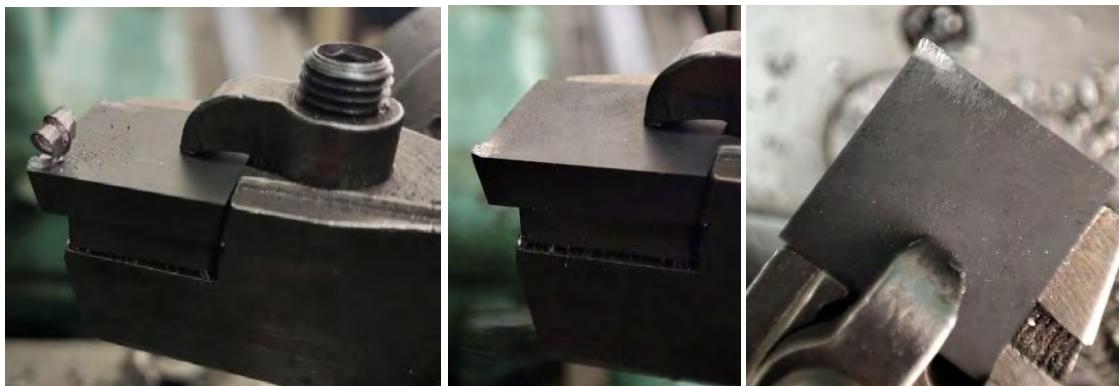


Рисунок 4. Пластина с наростом

Полученные образцы были промаркированы и залиты прозрачной эпоксидной смолой в специальных емкостях для проведения дальнейшего микроструктурного анализа.

## 5. Оборудование и методы исследования

Для исследования подошвы нароста был проведен микроструктурный анализ на цифровом микроскопе и растровом электронном с EDS спектрометром (рис.5). Были подготовлены шлифы и протравлены в спиртовом растворе азотной кислоты.



a)

б)

в)

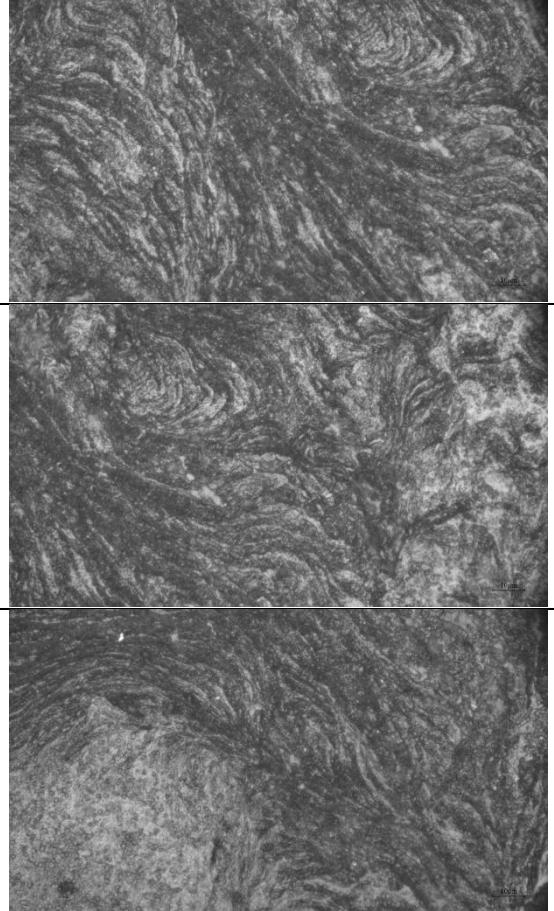
Рисунок 5. Применяемое оборудование: а) цифровой микроскоп МЕТ 1Т; б) машина полировальная МП.2-230; в) растровый электронный микроскоп WIN SEM A6000 с EDS спектрометром

## 6. Анализ полученных результатов

Микрофотографии с цифрового микроскопа представлены в таблице 2.

Таблица 2. Микрофотографии подошв нароста, полученные на цифровом микроскопе МЕТ 1Т

№	Режимы резания	Микрофотография
1	$V = 15 \text{ м/мин}$ $S_0 = 0,14 \text{ мм/об}$	
2	$V = 20 \text{ м/мин}$ $S_0 = 0,21 \text{ мм/об}$	
3	$V = 27,6 \text{ м/мин}$ $S_0 = 0,14 \text{ мм/об}$	

4	$V = 40$ м/мин $S_0 = 0,21$ мм/об	
---	--------------------------------------	---

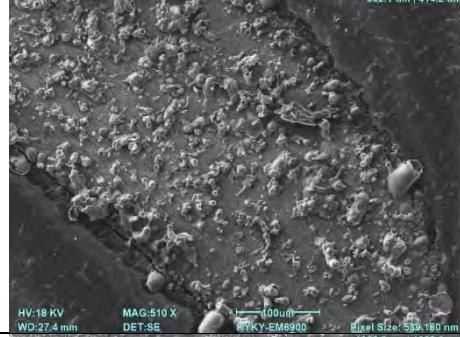
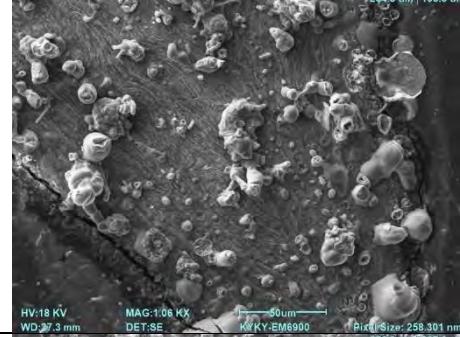
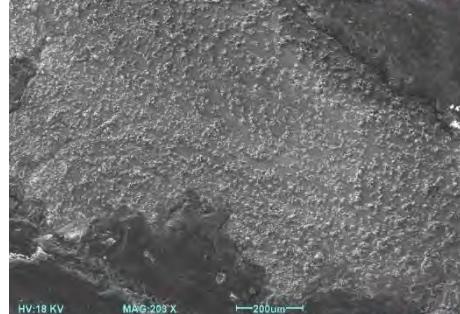
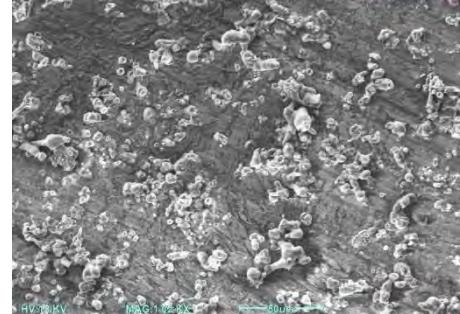
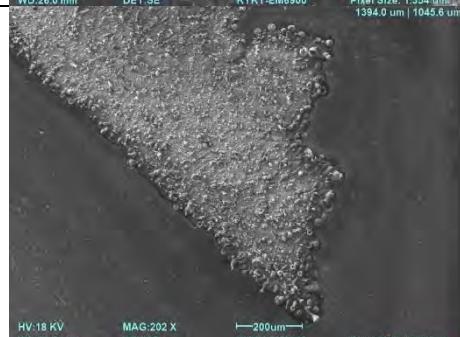
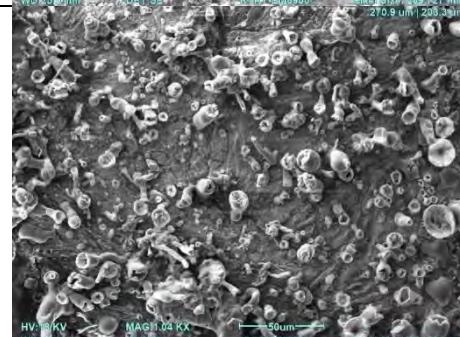
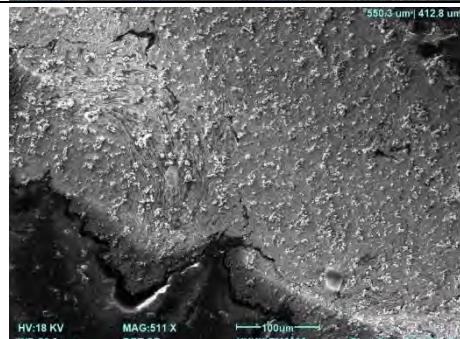
На изображениях явно просматриваются дугообразные или слоистые структуры, напоминающие слои материала, которые сформированы под воздействием значительных деформационных процессов. Такая текстура указывает на образование слоев из-за значительного пластического сдвига, что характерно для металлов, которые подверглись интенсивной механической обработке. Слои имеют явно выраженное направление, что может свидетельствовать о процессе пластической деформации. Направленность структур свидетельствует о сдвиговых напряжениях, вызванных механической обработкой. На нижней части изображений можно наблюдать участки с менее выраженной слоистостью и более размытой текстурой, что может говорить о присутствии различных участков, где пластическая деформация была менее выраженной. Эти области могут представлять собой участки с другими фазовыми составами или зернами, которые остались относительно неизмененными в ходе обработки. Таким образом, микроструктура, представленная на изображении, имеет выраженную слоистую текстуру, которая свидетельствует о значительном уровне пластической деформации и сдвиговых напряжениях. Подобные структуры характерны для материалов, которые подверглись интенсивной механической обработке, например, точению или другим видам деформирующих процессов, при которых происходило сдвиговое деформирование и ориентация зерен в направлении приложения сил.

В структурах подошв нароста отчетливо видны вихревые моды деформации [6], возникающие в процессе адгезии, результатом чего является пластическая деформация контактных слоёв и диссипация внутренней энергии. Образовываются адгезионные

связи при сопутствующих структурных превращениях в очагах схватывания, которые приводят к вырыву зерен карбида с поверхности режущего инструмента (пластины).

Микрофотографии с электронного микроскопа WIN SEM A6000 представлены в табл. 3.

Таблица 3. Микрофотографии подошв нароста, полученные на электронном микроскопе WIN SEM A6000

№	Режимы резания	Микрофотография	
1	V = 15 м/мин S <sub>0</sub> = 0,14 мм/об	 HV:18 KV MAG:510 X WD:27.4 mm DET:SE KYKY-EM6900 Pixel Size: 539.180 nm 1386.2 um   1038.8 um	 HV:18 KV MAG:1064 X WD:27.3 mm DET:SE KYKY-EM6900 Pixel Size: 258.301 nm 276.2 um   207.3 um
2	V = 20 м/мин S <sub>0</sub> = 0,21 мм/об	 HV:18 KV MAG:203 X WD:26.0 mm DET:SE KYKY-EM6900 Pixel Size: 1.354 um   1394.0 um   1045.6 um	 HV:18 KV MAG:1064 X WD:26.0 mm DET:SE KYKY-EM6900 Pixel Size: 250.271 nm 270.9 um   203.3 um
3	V = 27,6 м/мин S <sub>0</sub> = 0,14 мм/об	 HV:18 KV MAG:202 X WD:28.2 mm DET:SE KYKY-EM6900 Pixel Size: 1.361 um	 HV:18 KV MAG:1064 X WD:28.2 mm DET:SE KYKY-EM6900 Pixel Size: 254.551 nm
4	V = 40 м/мин S <sub>0</sub> = 0,21 мм/об	 HV:18 KV MAG:511 X WD:26.0 mm DET:SE KYKY-EM6900 Pixel Size: 539.180 nm	 HV:18 KV MAG:1064 X WD:26.0 mm DET:SE KYKY-EM6900 Pixel Size: 258.301 nm

Изображения демонстрируют относительно неоднородную структуру поверхности с зернистой текстурой. Можно наблюдать наличие множества частиц разного размера и формы, которые равномерно распределены по поверхности. Частицы на поверхности различаются по форме и размерам. Некоторые из них представляют собой округлые агрегаты, в то время как другие имеют более неправильную и вытянутую форму. Подобные морфологические характеристики могут говорить о неоднородных условиях деформации материала. По масштабу можно предположить, что частицы имеют микронные размеры. Наличие сферических частиц может быть связано с присутствием оксидов железа, которые образуются на поверхности при воздействии воздуха на высоких температурах. В этом случае частицы могут быть продуктами абразивного износа и возникать вследствие схватывания при контакте стружки с инструментом. Таким образом, микроструктура на изображении указывает на наличие фазовых и механических неоднородностей, вызванных как внешними воздействиями (механическая обработка), так и внутренними (структурные изменения, связанные с фазовыми переходами и диффузионными процессами).

На структуре видны вихревые моды деформаций, а также многочисленные включения различных форм. Дополнительно был проведен спектральный анализ включений (рис. 6), который показал наличие частиц кислорода, железа и кобальта на поверхности.

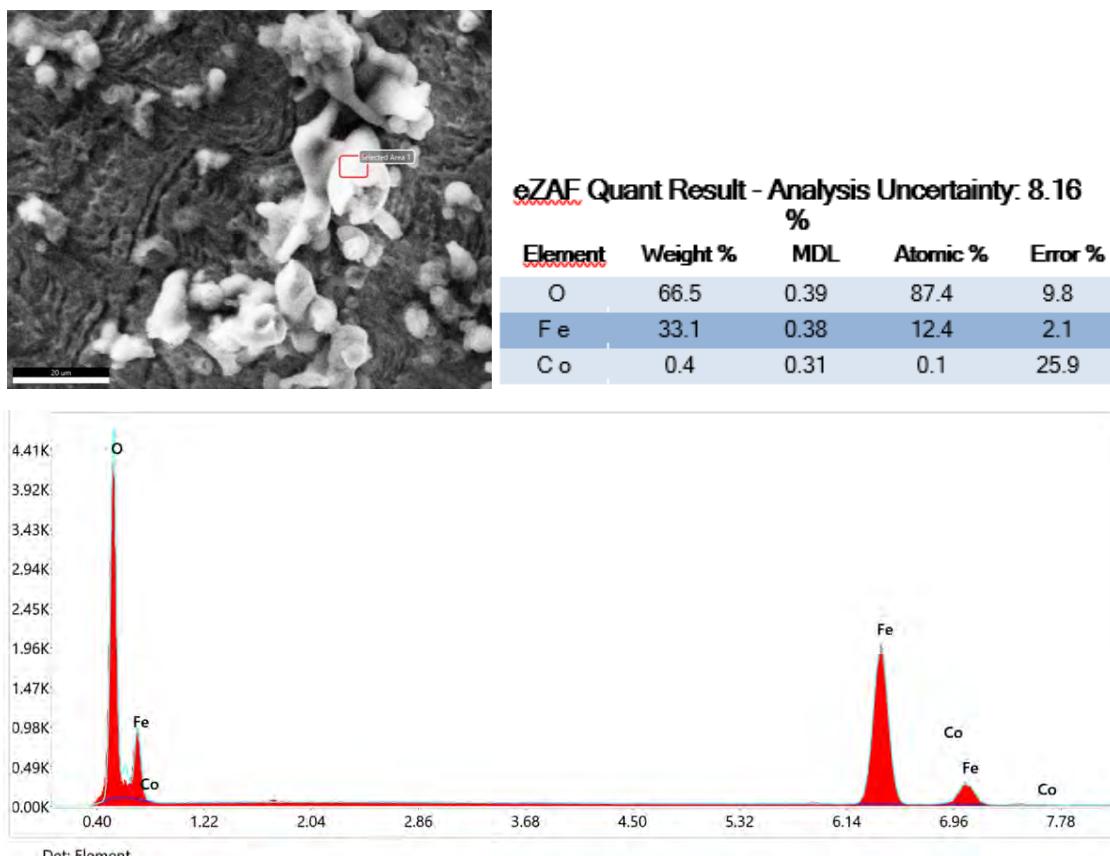


Рисунок 6. Результаты спектрального анализа образца

Таким образом, с помощью спектрального анализа установлено, что ювенильные поверхности (т.е. не окисленная и ещё не взаимодействовавшая с атмосферой) в зоне подошвы нароста, образующиеся в процессе трения при лезвийной

обработке, активно участвуют в процессе образования вторичных структур, таких как оксида железа ( $Fe_2O_3$ ) и кобальта (Co). Окисные плены железа образуются в следствии взаимодействия частиц с воздухом. Кобальт на поверхности подошвы нароста говорит об адгезионном износе режущего инструмента. Под воздействием больших удельных давлений вследствие стружкообразования зерна карбида оголяются, раскачиваются, связь между ними ослабевает и частицы вырываются с поверхности пластины вместе с наростом.

## 7. Заключение

Нарост образуется из-за адгезии обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента и этому способствуют ювенильная прирезцовная поверхность, довольно высокая температура в зоне контакта (от 200 до 500 °C) и удельные давления, оттого нарост имеет слоистую структуру. Слоистость и неоднородности на изображениях микроструктуры являются следствием развития деформационных полос — участков, в которых происходило перераспределение материала под воздействием нагрузки. На подошве нароста видны вихревые моды деформации, которые способствуют раскачиванию частиц твердого сплава и их вырыву с поверхности режущего инструмента (пластины).

Пути минимизации наростообразования:

1. Оптимизация режимов резания: увеличение скорости резания до области, в которой отсутствует наростообразование.

2. Правильный выбор инструментальных материалов: изменение геометрии режущей части, использование инструментов с износостойкими наноструктурными покрытиями (AlTiN, AlCrN и др.), которые обладают повышенной стойкостью к адгезии. Применение твердых сплавов с низким коэффициентом трения (со слабыми интерметаллическими связями между стружкой и инструментом).

3. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ): применение эффективных СОЖ снижает температуру в зоне резания и уменьшает трение, предотвращая формирование нароста.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов: учебник / А. М. Адаскин, А. Н. Красновский. — М.: ФОРУМ: 2018. — 400 с. — (Высшее образование: Бакалавриат).
2. Древаль Алексей Евгеньевич, Лужанский Максим Сергеевич Наростообразование и работоспособность режущего инструмента // Известия вузов. Машиностроение. 2012. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/narostobrazovanie-i-rabotosposobnost-rezhuschego-instrumenta> (дата обращения: 18.11.2024).
3. Полетика Михаил Федорович Микроструктура и микротвердость в зоне резания при работе резцом с фаской // Известия ТПУ. 1957. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrostruktura-i-mikrotverdost-v-zone-rezaniya-pri-rabote-reztsom-s-faskoy> (дата обращения: 18.11.2024).
4. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. — М.: Высшая школа, 1985. — 304 с.
5. Научные основы управления микро- и макроструктурой металла заготовок, полученных аддитивным выращиванием, путем послойного нано- и дисперсного модифицирования для повышения механических характеристик изделий: монография /

Кабалдин Ю. Г. – Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2024. – 193 с.

6. Кабалдин, Ю. Г. Влияние пластической неустойчивости приконтактных слоев стружки на механизм изнашивания твердосплавного инструмента / Ю. Г. Кабалдин, А. А. Башков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 10(751). – С. 89-95. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-10-89-95. – EDN RDTIUF.

7. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

Поступила в редакцию 10.03.2025 г.

**И. А. Горобец, канд. техн. наук, доц., В. В. Горбань, аспирант.**  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, РФ  
E-mail: igor.gorobets2022@yandex.ru

## СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИИ 8D – ПРИНТЕРА

*Предложены структурная и кинематическая схемы 8D-принтера с дополнительными избыточными степенями свободы рабочих органов. Разработаны расчётные схемы для подбора привода подвижных платформ принтера. Синтезирована 3D-модель дельта принтера повышенной производительности за счет реализации 8D-печати. Предложенные схемы и разработанные 3D модели устройства повысят эффективность эксплуатации 3D-принтеров.*

**Ключевые слова:** принтер, структура, кинематика, модель, привод, технология, производительность.

**I. A. Gorobets, V. O. Gorban**

### SYNTHESIS OF THE 8D PRINTER DESIGN

*The structural and kinematic schemes of an 8D printer with additional redundant degrees of freedom of the working organs are proposed. Calculation schemes have been developed for selecting the drive of the printer's mobile platforms. A 3D model of a delta printer with increased productivity has been synthesized due to the implementation of 8D printing. The proposed schemes and developed 3D models of the device will increase the efficiency of 3D printers.*

**Keywords:** printer, structure, kinematics, model, drive, technology, performance.

### 1. Введение

Дальнейшее совершенствование технологий изготовления машиностроительных изделий тесно связано с использованием новых подходов и принципов, реализующих идеи аддитивных технологий, состоящих в послойном увеличении размеров объекта производства [1, 2]. Для реализации принципов аддитивных технологий используются цифровая модель объекта производства и цифровая технология ее изготовления в виде разработанных 3D-модели и управляющей программы для 3D принтера, полученные в ходе технической подготовки производства. Технологический процесс получения готового изделия осуществляется запрограммированными движениями рабочего органа, работающего в одной из известных систем координат: Декартовой, полярной, цилиндрической, сферической, ангулярной [3, 4]. При этом рабочий орган может иметь от 3 и выше степеней подвижности, рис. 1.

Недостатком известных конструкций объемной печати, реализующих принципы аддитивного производства, являются ограничения в производительности работ, обусловленные особенностями конструкции 3D-принтера [2, 4] и технологиями объемной печати. В связи с перечисленными конструктивными и эксплуатационными особенностями устройств объемной печати, актуальным является вопрос увеличения производительности и расширения технологических возможностей 3D-принтеров с учётом преимуществ многоосевой печати.

Целью исследований является повышение производительности 3D печати Дельта принтера, за счет изменений схемы конструкции подвижной платформы путем ввода дополнительных степеней подвижности рабочего органа.

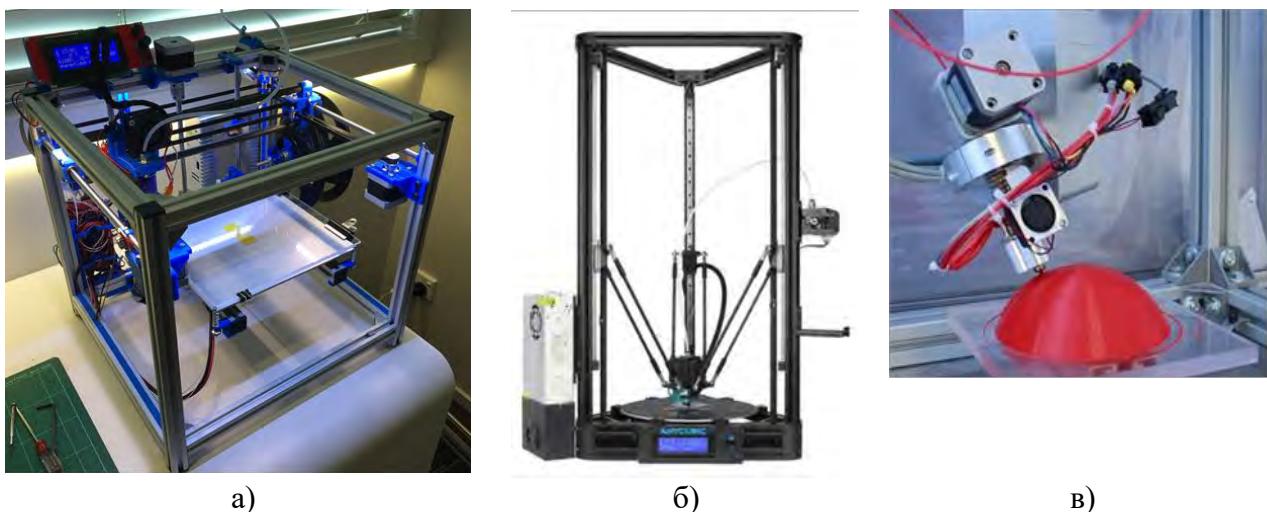


Рисунок 1. Вид конструкций 3D-принтеров: а) HyperCube; б) Kossel компании Anycubic; в) с подвижным 5D экструдером

## 2. Основное содержание и результаты работы

В качестве прототипа для синтеза конструкции использовался 3D-принтер параллельной структуры, обладающий рядом преимуществ по скорости и точности печати [2, 4, 5, 6]. Для синтеза конструкции рабочего органа авторы провели системный анализ известных структур принтера [4]. Для реализации поставленной цели авторами было предложено дополнить конструкцию устройства 3D-печати [2, 5, 6] тремя дополнительными степенями подвижности рабочего органа. Структурная схема модифицированного дельта принтера приведена на рис. 2а и содержит три параллельно расположенные вертикальные направляющие 1, с подвижными каретками 2. Каждая из кареток 2 соединена с подвижной платформой 4 посредством тяг 3. Структурная схема подвижной платформы 4 включает две поворотные платформы 9, 10, которые имеют возможность независимого поворота относительно вертикальной оси, реализуемых поворотными механизмами 7, 8 и 5, 6, соответственно. Подвижная платформа 4 предусматривает два рабочих органа 16 и 17, имеющих дополнительную степень подвижности, за счёт поворотного механизма, снабженного преобразователями движения 13, 14 и 15, что обеспечивает возможность поворота печатающего органа на заданный угол. Для реализации одновременной работы экструдеров на нижней поворотной платформе 10 жёстко закреплён ходовой винт 11, взаимодействующий с приводом 12.

Для синтеза конструкции принтера разработана кинематическая схема (рис. 2б), включающая следующие элементы: шаговый двигатель перемещения кареток 1, ходовые винты кареток 27, вертикальные направляющие 2 и 3, каретки 4, шаровые шарниры 5, 6 соединенные с кареткой 4, тяги 7 и 8 с шарнирными опорами 9, 10 присоединенные к подвижной платформе 11, поворотные платформы 15, 19, вал-шестерня поворота нижней платформы 12, приводные шаговые двигатели поворота платформ 16, 14, шестерни шаговых двигателей 13, 17, шестерня поворота верхней платформы 18, ходовой винт перемещения экструдера 20, корпус неподвижного экструдера 28, корпус подвижного экструдера 29, 30 шаговый двигатель перемещения подвижного экструдера 21, шестерни 24, 25, 26, рабочий орган 23, опорная ось экструдера 22.

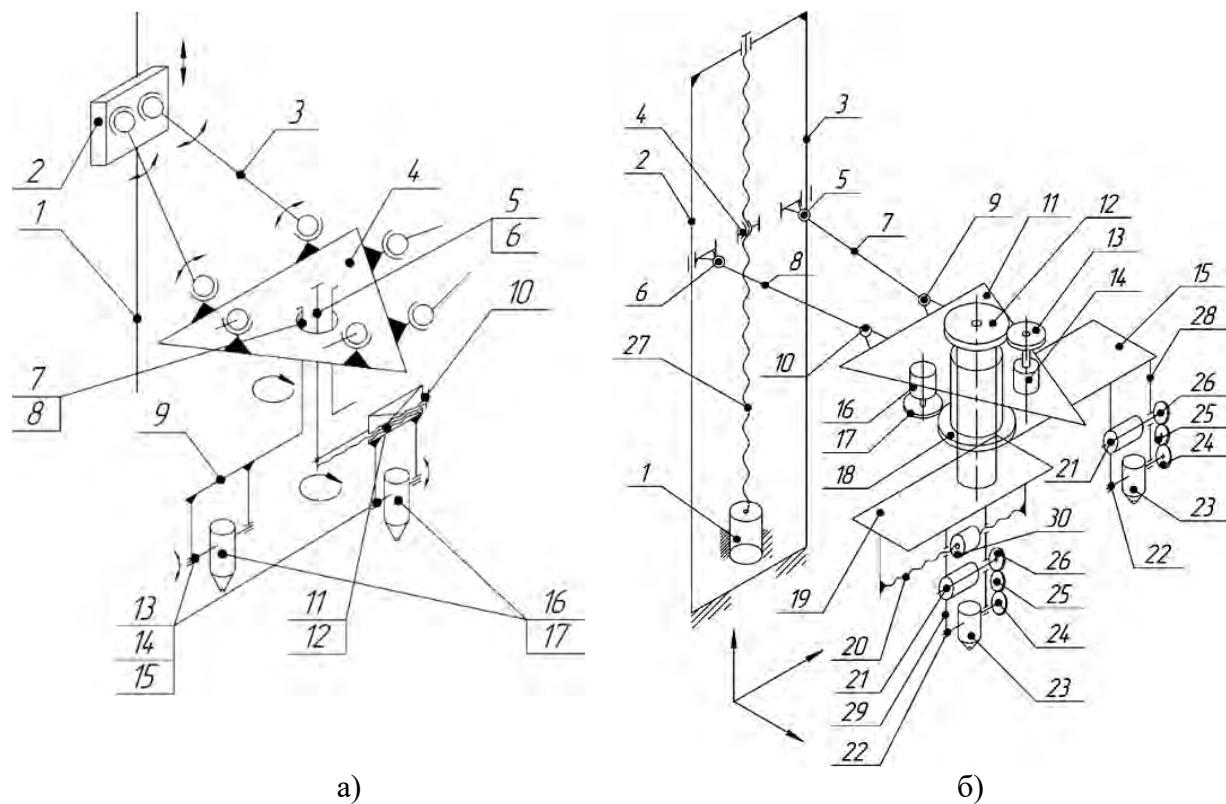


Рисунок 2. Структурная а) и кинематическая б) схемы 8D принтера

На основе разработанных структурной и кинематических схем (рис. 2) принтера в среде КОМПАС-3D спроектированы модели деталей, сборочных узлов и синтезирована 3D – модель 8D принтера, рис. 3.

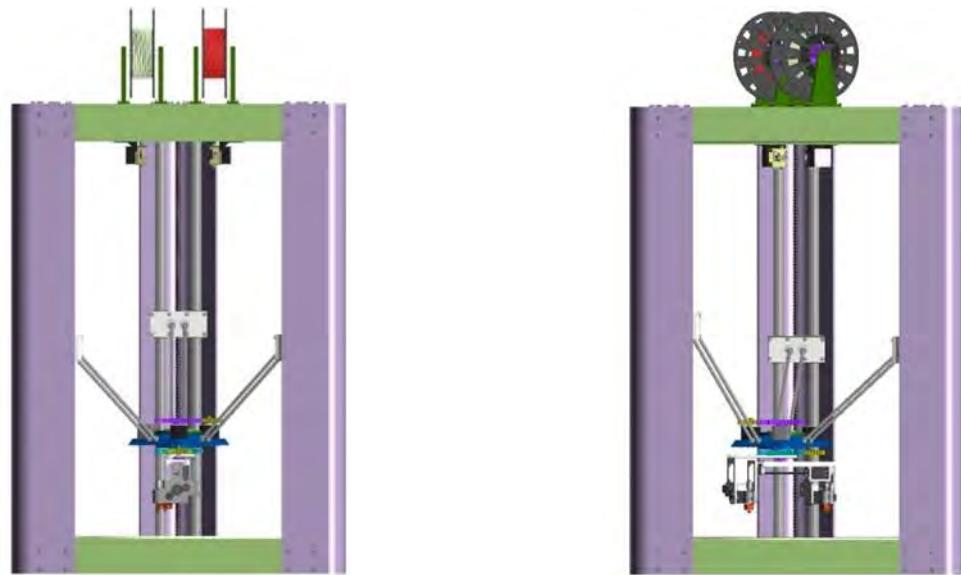


Рисунок 3. Модель 8D – принтера

Принцип работы дельта принтера заключается в следующем: при подаче электрической энергии на привод, расположенный в основании 1 (рис. 4), ротор двигателя передает крутящий момент ходовому винту 2 и перемещает каретку 3 по

направляющим 17. Каждая каретка связана при помощи тяг с подвижной платформой 5, что предполагает изменение положения подвижной платформы 5 при поступательном перемещении кареток 3 вдоль направляющих устройства. При этом подвижная платформа 5 занимает необходимое положение, определяемое заданными программой координатами относительной области печати. На платформе 5 подвижно установлены рабочие органы в виде двух экструдеров.

Возможность независимой работы экструдеров реализуется следующим образом. Поворотное движение верхней поворотной платформы 13 достигается за счёт передачи крутящего момента от шагового приводного двигателя 7, посредством шестерни 12 и зубчатого колеса 11. Аналогичным образом организовано поворотное движение нижней поворотной платформы 16 от шагового двигателя 4 через приводную шестерню 8 и вал-шестерни 6. Дополнительное линейное перемещения экструдера вдоль нижней поворотной платформы 16 реализуется за счёт ходового винта 15, который является элементом конструкции приводного шагового двигателя 14, рис. 3.

Процесс подачи филамента реализован от катушек 9 и 10 на фидеры 18, 19 (рис. 4), которые протягивают нить филамента (при помощи встроенного электродвигателя) для подачи в экструдеры. Экструдерами реализуется расплавление филамента и запрограммированное объёмное движение, которое и осуществляет принцип 3D печати объекта.

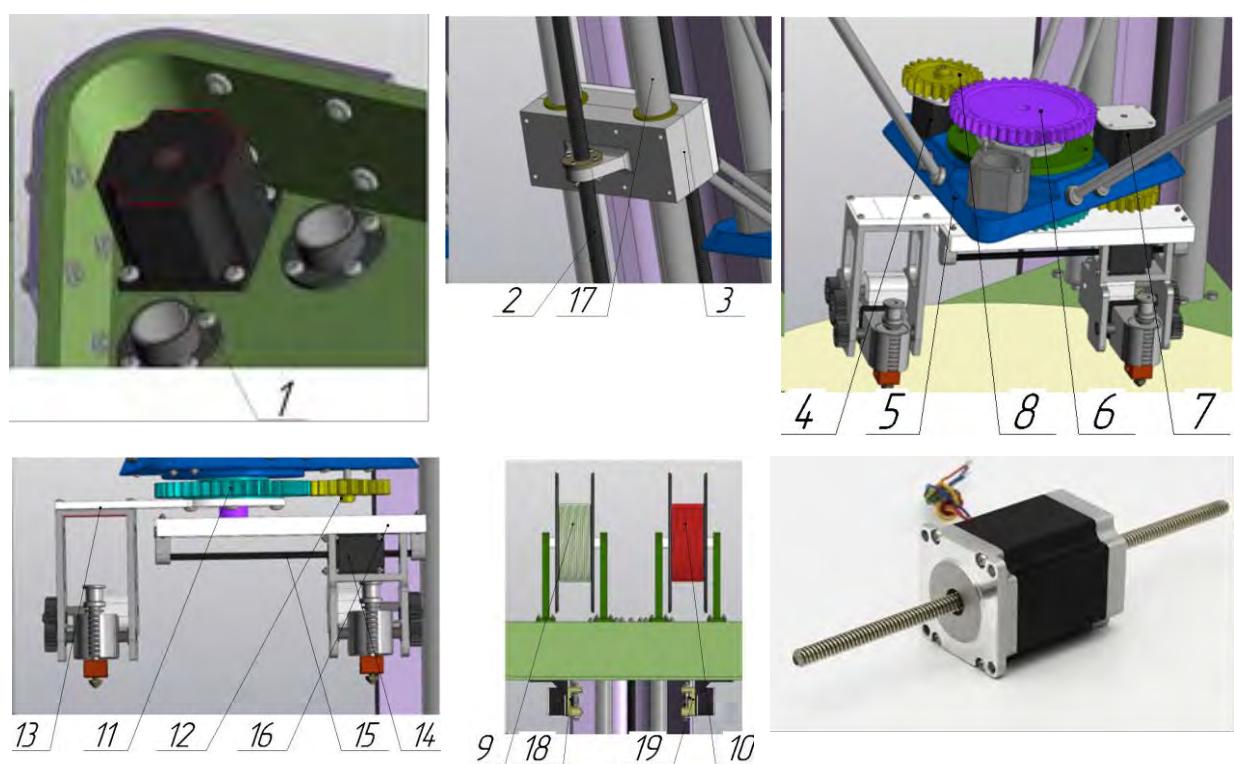


Рисунок 4. Элементы конструкции дельта принтера

Подбор электродвигателей производился по мощности и необходимому крутящему моменту [2, 4]. Для определения параметров электродвигателей разработана расчётная схема, рис. 5а. На схеме указаны следующие элементы: электродвигатели,

ведущие шестерни, зубчатые колеса. Для расчёта принимаем граничное положение подвижного экструдера. Для определения параметров линейного двигателя разработана расчетная схема, рис. 5б.

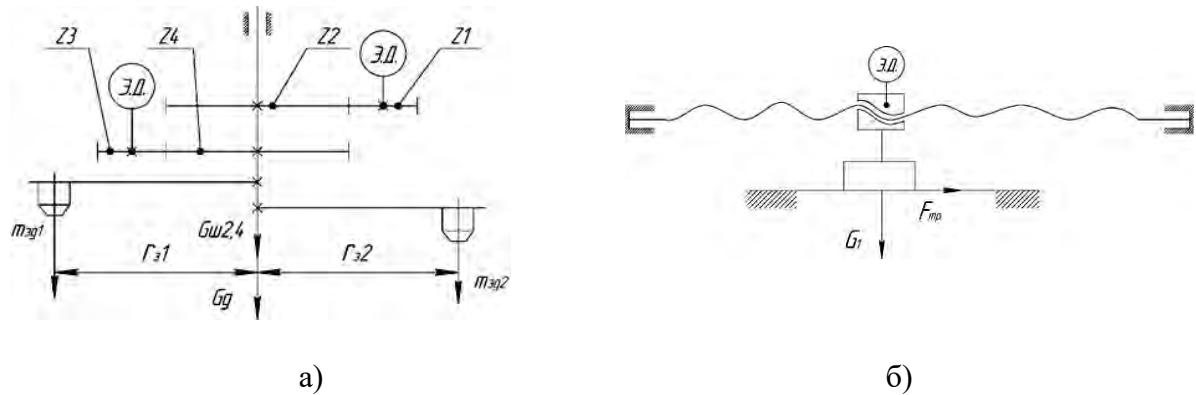


Рисунок 5. Расчётные схемы для выбора: а) шагового, б) линейного двигателей

На рис. 5 обозначено: ЭД – электродвигатель, Z – зубчатые колеса;  $m_{\text{эд}}$  – масса сборочной единицы экструдера;  $G_{\theta}$  – вес платформы;  $G_{\text{ш}2,4}$  – вес зубчатых колес  $Z_2$  и  $Z_4$ ;  $r_3$  – расстояние расположения экструдеров относительно оси поворота платформ;  $G$  – вес подвижной части рабочего органа нижней платформы;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения, возникающая при перемещении подвижной части рабочего органа по направляющей поворотной платформы.

По результатам расчетов в качестве шаговых двигателей платформы приняты двигатели NEMA 17 SL42STH48-1684B, в качестве приводного двигателя линейного перемещения экструдера выбран двигатель NEMA 11 28SHD4202-03TL. Принятая компоновка приводного электродвигателя позволила упростить конструкцию редуктора для передачи крутящего момента силовым механизмам.

Для решения задачи печати в труднодоступных местах была использована конструкция поворотного механизма рабочего органа, рис.6, применяемая в работах [5, 6]. Такая конструкция позволяет упростить печать специальных навесных структур, а также при необходимости печати одним экструдером поворот рабочего органа позволит предотвратить вытекание пластика из неактивного сопла.

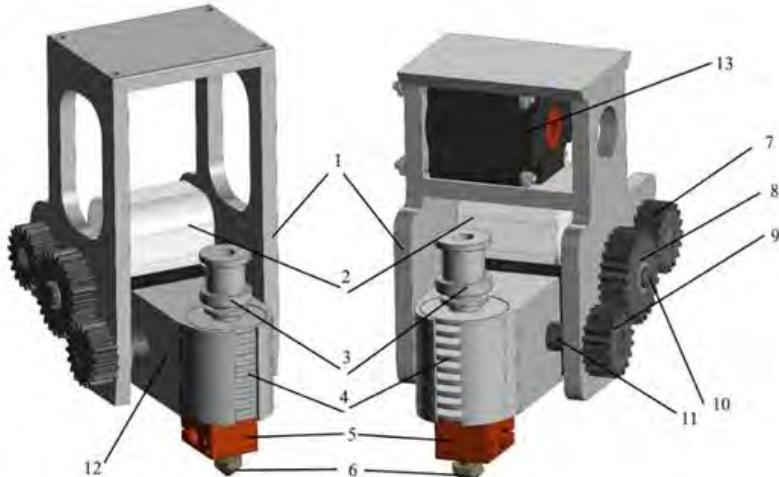


Рисунок 6. Модели поворотных механизмов печатающих органов

При проектировании конструкции поворотного экструдера в качестве аналога принят рабочий орган типа Bowden [7], в качестве привода - электродвигатель компании Azgant.

Спроектированные узлы и детали принтера рассчитаем на прочность в специализированном приложении APM FEM КОМПАС-3D. Результаты расчетов конструкций поворотных платформ приведены на рис. 7.

Результаты исследований подтверждают замыслы авторов, характеризующие незначительные механические напряжения и деформации поворотных платформ при приложении рабочих нагрузок.

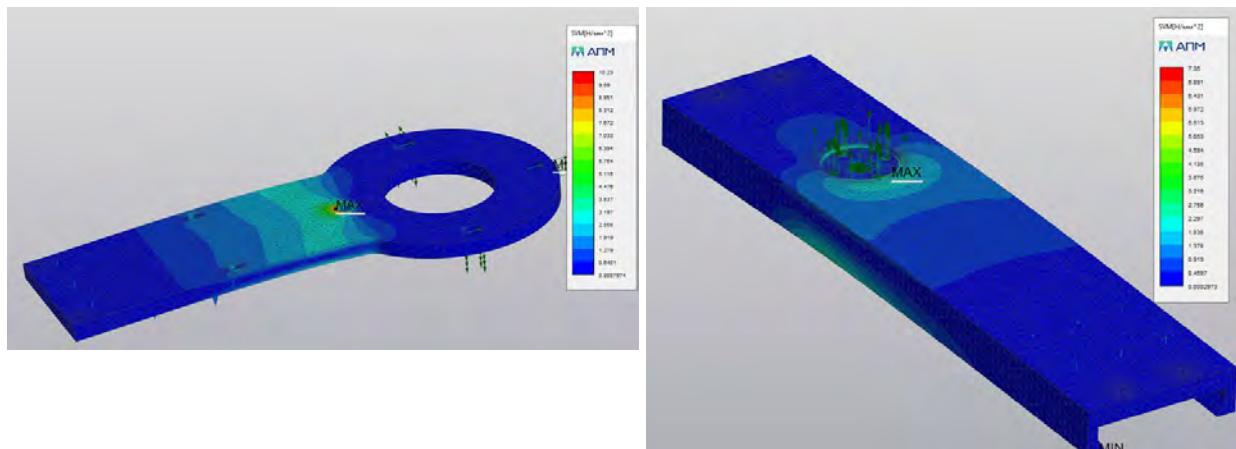


Рисунок 7. Вид напряжённого состояния подвижных платформ принтера

Таким образом, разработанная конструкция и схема расположения подвижных платформ с экструдерами даёт возможность независимого движения рабочих органов в рамках допустимых пределов прочности и деформаций устройства, что позволит не только расширить технологические возможности работы 3D-принтера, например, печатать одну большую деталь двумя экструдерами одновременно или печатать одновременно две одинаковые детали меньшего размера, но и использовать новые технологии печати, позволяющие существенно увеличить производительность выполнения работ.

### 3. Заключение

Проведенные авторами исследования позволили разработать структурную и кинематическую схемы 8D-принтера Дельта компоновки, в которой впервые предложено дополнение верхней платформы принтера двумя поворотными платформами с экструдерами, с независимым движением и коаксиально расположенными осями поворота. Экструдер, расположенный на нижней поворотной платформе, имеет возможность продольного поступательного перемещения вдоль платформы. Экструдеры имеют возможность наклона на угол  $\alpha$  к вертикальной оси Z принтера.

По результатам проведенной работы синтезирована 3D-модель принтера с дополнительной функциональностью для реализации 8D-печати, позволяющая реализовать новые технологии объемной печати с высокой производительностью и точностью выполняемых работ.

Предложенные структурная, кинематическая схемы и разработанная конструкция устройства могут использоваться проектными и инженерными

компаниями, машиностроительными предприятиями на стадии проектирования новых и модернизации существующих промышленных 3D-принтеров, что позволит повысить их производительность и реализовать новые технологии печати объектов машиностроения.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш // Пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. - 220 с.
2. Горобец, И. А. Проектирование и моделирование параметров 3D-принтера параллельной структуры / И. А. Горобец, Д. О. Киселица, Д. С. Жарких // Высокие технологии в машиностроении Материалы ХХI всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - Самара, СГТУ, 2024. С.25-29
3. Хейло, С. В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ: монография [Текст] /С. В. Хейло, В. А. Глазунов, С. В. Палочкин – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011. – 153с.
4. Горобец, И. А. Исследование структурных схем конструкций 3D-принтера [Текст] / И. А. Горобец, Лахин А. М., Киселица Д. О., Жарких Д. С. // Машиностроение и техносфера ХХI века // Сборник трудов ХХIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2022 г. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – С. 80-83.
5. Горобец, И. А. Исследование и разработка конструкции 3D - принтера повышенного объёма печати [Текст] / И. А Горобец, Д. О. Киселица, Д. С. Жарких // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - Донецк, ДонНТУ, выпуск № 3(82)' 2023.- С.19-25
6. Горобец, И. А., Синтез конструкции модуля экструдера 5D-принтера / И. А. Горобец, Д. О. Киселица, Д. С. Жарких // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» – Донецк, ДонНТУ, выпуск № 1(84)' 2024.- С.3-10.

Поступила в редколлегию 19.03.2025 г.

С. А. Матвиенко, канд. техн. наук, доц.,  
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Россия  
Тел./Факс: +7 (949) 3678009; E-mail: [s.a.matvienko@donnasa.ru](mailto:s.a.matvienko@donnasa.ru)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В статье рассмотрено направление расширения возможностей холодного газодинамического напыления и улучшения качества покрытий за счет применение внешних полей, в частности магнитного поля. Представлена математическая модель комбинированной технологии на базе холодного газодинамического напыления и магнитной обработки. Модель основана на трехфазном подходе и учитывает взаимодействие между газовой фазой и дискретной фазой, состоящей из порошковых частиц. Предложенная модель состоит из подмоделей газовой динамики, движения частиц, воздействия магнитного поля, формирования покрытия.

**Ключевые слова:** газодинамическое напыление, магнитное поле, модель, уравнение, покрытие, движение, теплоперенос.

S. A. Matvienko

### MATHEMATICAL MODEL OF COLD GAS DYNAMIC SPUTTERING IN A MAGNETIC FIELD

*The article considers the direction of expanding the possibilities of cold gas dynamic spraying and improving the quality of coatings through the use of external fields, in particular a magnetic field. A mathematical model of a combined technology based on cold gas dynamic spraying and magnetic treatment is presented. The model is based on a three-phase approach and takes into account the interaction between the gas phase and the discrete phase consisting of powder particles. The proposed model consists of submodels of gas dynamics, particle motion, magnetic field action, and coating formation.*

**Key words:** gas dynamic spraying, magnetic field, model, equation, coating, motion, heat transfer.

### 1. Введение

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) – перспективная технология нанесения покрытий, основанная на ускорении порошковых частиц струей сжатого газа до сверхзвуковых скоростей и их последующем соударении с подложкой. В отличие от термических методов, в ХГН отсутствует плавление материала, что позволяет сохранять его исходные свойства и наносить покрытия из широкого спектра материалов, включая те, которые чувствительны к высоким температурам [1].

ХГН представляет собой перспективный метод нанесения покрытий, отличающийся от традиционных термических методов, отсутствием плавления наносимого материала. Это позволяет сохранять исходные свойства материала, избегать нежелательных фазовых превращений и окисления, что особенно важно для функциональных покрытий. В процессе ХГН частицы порошка, ускоренные газовым потоком до сверхзвуковых скоростей, сталкиваются с подложкой и, деформируясь, формируют плотное покрытие [1]. В работе [2] в качестве основного метода исследования газодинамического наноимпринтинга использовалось прямое молекулярно-динамическое моделирование. В работе [3] проведены визуализация и измерение скорости движения частиц различных порошков в окрестности маски и сделаны следующие выводы: исключается влияние столкновений частиц друг с другом в потоке; абсолютная величина скорости проходящих частиц практически не отличается от скорости налетающих частиц; стандартное отклонение направления скорости частиц по углу лежит в пределах 1,5–2 град.

В работе [4] методами численного моделирования проведено исследование многофазных течений, формируемых в ходе процесса высокоскоростного холодного напы-

ления. Показано существенное повышение эффективности напыления при подаче микрочастиц за критическим сечением сопла, в области боковой поверхности струи.

Процесс ХГН подвержен ряду ограничений, связанных с управлением траекторией и скоростью частиц, особенно при нанесении покрытий на сложные поверхности или при использовании материалов с различными физическими свойствами. Для расширения возможностей ХГН и улучшения качества покрытий активно исследуется применение внешних полей, в частности магнитных полей, для воздействия на движущиеся частицы. Идея заключается в том, что, воздействуя магнитным полем на заряженные частицы в газовом потоке, можно влиять на их траекторию, скорость и концентрацию, что, в свою очередь, может привести к изменению характеристик покрытия.

Потенциальные преимущества применения магнитного поля в процессе ХГН включают увеличение эффективности осаждения, улучшение равномерности покрытия, повышение плотности и адгезии, а также возможность селективного напыления определенных материалов.

Магнитное поле может:

- сфокусировать поток частиц на подложке, увеличивая количество частиц, достигающих поверхности, и тем самым повышая эффективность осаждения;
- выравнивать траектории частиц, обеспечивая более равномерное распределение материала по поверхности подложки;
- влиять на ориентацию и упаковку частиц на поверхности подложки, изменяя микроструктуру покрытия и, как следствие, его механические и физические свойства;
- использоваться для селективного осаждения частиц различных материалов или размеров, позволяя создавать композитные покрытия с заданным составом и структурой.

Однако, взаимодействие магнитного поля с потоком частиц в процессе ХГДН представляет собой сложный физический процесс, требующий детального изучения и математического моделирования. Необходимо учитывать влияние магнитного поля на динамику газового потока, траектории частиц, их столкновения с подложкой и процесс формирования покрытия.

Создание адекватной математической модели ХГН в магнитном поле является сложной задачей, требующей учета множества физических явлений, включая:

- газовую динамику;
- теплоперенос;
- взаимодействие частиц с газовым потоком и магнитным полем;
- процессы деформации и адгезии при ударе о подложку.

Существующие модели ХГН, как правило, основаны на решении уравнений Навье–Стокса для газовой фазы и уравнений движения для частиц, с учетом сил аэродинамического сопротивления, гравитации и других внешних сил [5, 6]. Однако, учет влияния магнитного поля требует включения в модель дополнительной силы, действующей на магнитные частицы.

Целью данной работы является разработка математической модели ХГН в магнитном поле, которая позволит исследовать влияние различных параметров процесса (скорости и температуры газа, размера и магнитных свойств частиц, напряженности магнитного поля) на формирование покрытия.

## 2. Уравнения газовой динамики

Уравнения газовой динамики описывают движение и состояние несущего газа в сопле и струе. Уравнения, описывающие газовую фазу, включают в себя закон сохранения массы, закон сохранения импульса и закон сохранения энергии [7, 8, 9].

Для описания сверхзвукового течения газа используются уравнения Эйлера [8] или Навье–Стокса [9].

Уравнения Эйлера (для идеального газа):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v^2 + pI) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho E + p)v) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = (\gamma - 1)(\rho E - 1/2\rho v^2), \quad (4)$$

где:  $\rho$  – плотность газа;  $v$  – вектор скорости газа;  $p$  – давление газа;  $E$  – полная энергия газа;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $I$  – единичная матрица.

Уравнения Навье–Стокса (для вязкого газа):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v^2) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g + F_m, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho ev) = -p\nabla v + \tau\nabla v + \nabla q + Q_m, \quad (7)$$

где:  $\rho$  – плотность газа;  $v$  – вектор скорости газа;  $p$  – давление газа;  $\tau$  – тензор вязких напряжений;  $g$  – вектор ускорения свободного падения;  $e$  – удельная внутренняя энергия газа;  $q$  – вектор теплового потока,  $F_m$  – сила, действующая на газ со стороны магнитного поля,  $Q_m$  – мощность тепловыделения в газе за счет взаимодействия с магнитным полем.

Тензор вязких напряжений  $\tau$  и вектор теплового потока  $q$  определяются с помощью соответствующих конститутивных уравнений, зависящих от модели вязкости и теплопроводности газа.

Тензор вязких напряжений определяется как:

$$\tau = \mu(\nabla v + (\nabla v)^T) - (2/3)\mu(\nabla v)I, \quad (8)$$

где:  $\mu$  – динамическая вязкость газа;  $I$  – единичный тензор.

Вектор теплового потока  $q$  определяется законом Фурье:

$$q = -k\nabla T, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности газа;  $T$  – температура газа.

Сила  $F_m$  и мощность  $Q_m$ , обусловленные взаимодействием газа с магнитным полем, зависят от электрических свойств газа и напряженности магнитного поля. В случае слабоионизованного газа, которым обычно является несущий газ в ХГН, эти величины могут быть пренебрежимо малыми.

Для замыкания системы уравнений необходимо задать уравнение состояния газа, связывающее давление, плотность и температуру. В качестве уравнения состояния обычно используется уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho RT, \quad (10)$$

где  $R$  – газовая постоянная.

### 3. Уравнение движения твердых частиц

Движение каждой твердой частицы описывается уравнением Ньютона второго закона, учитывающим силы, действующие на частицу [10]:

Уравнение движения отдельной порошковой частицы имеет вид:

$$m_p dv_p/dt = F_D + F_G + F_M, \quad (11)$$

где:  $m_p$  – масса частицы;  $v_p$  – вектор скорости частицы;  $F_D$  – сила аэродинамического сопротивления;  $F_G$  – сила гравитации;  $F_M$  – электромагнитная сила.

Сила аэродинамического сопротивления  $F_D$  определяется эмпирическими зависимостями, зависящими от числа Рейнольдса, рассчитанного на основе относительной скорости частицы и газа:

$$F_D = (1/2)C_D \rho A_p |v - v_p| (v - v_p), \quad (12)$$

где:  $C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $A_p$  – площадь попечного сечения частицы;

Коэффициент аэродинамического сопротивления зависит от числа Рейнольдса, рассчитанного относительно скорости частицы:

$$Re_p = \rho |v - v_p| d_p / \mu, \quad (13)$$

где:  $d_p$  – диаметр частицы;  $\mu$  – динамическая вязкость газа.

Для сферических частиц коэффициент аэродинамического сопротивления может быть аппроксимирован следующей формулой:

$$C_D = 24/Re_p (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), \quad (14)$$

Сила гравитации определяется как:

$$F_G = m_p g, \quad (15)$$

Магнитная сила  $F_M$  зависит от магнитных свойств материала частицы и конфигурации магнитного поля. Для немагнитных частиц магнитная сила может быть пренебрежимо мала. Для частиц с магнитными свойствами (ферромагнетиков, парамагнетиков) необходимо учитывать силу, возникающую при взаимодействии магнитного момента частицы с градиентом магнитного поля.

Сила тяжести  $F_G$  обычно пренебрежимо мала по сравнению с аэродинамической силой, особенно при высоких скоростях частиц.

Электромагнитная сила, действующая на заряженную частицу в магнитном поле, определяется как сила Лоренца:

$$F_M = q (v_p B), \quad (16)$$

где:  $q$  – электрический заряд частицы;  
 $B$  – вектор магнитной индукции.

#### 4. Уравнение воздействия внешнего поля

Основным уравнением, описывающим движение заряженной частицы в магнитном поле, является уравнение Лоренца:

$$m * dV/dt = q * (E + V B) + F_d, \quad (17)$$

где:  $m$  – масса частицы;  $V$  – скорость частицы;  $q$  – заряд частицы;  $E$  – напряженность электрического поля;  $B$  – индукция магнитного поля;  $F_d$  – сила аэродинамического сопротивления, действующая на частицу.

Сила Лоренца ( $q(E+VB)$ ) описывает взаимодействие заряженной частицы с электрическим и магнитным полями. Сила аэродинамического сопротивления ( $F_d$ ) описывает сопротивление газового потока движению частицы.

Для решения этого уравнения необходимо знать распределение электрического и магнитного полей, а также зависимость силы аэродинамического сопротивления от скорости частицы и параметров газового потока. В общем случае, уравнение Лоренца представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка, которую можно решить численными методами

Для определения магнитной силы необходимо знать распределение магнитного поля в области напыления. Магнитное поле описывается уравнениями Максвелла:

$$\nabla H = J; B = \mu H; \nabla H = J, \quad (18)$$

где:  $B$  – вектор магнитной индукции;  $H$  – вектор напряженности магнитного поля;  $J$  – вектор плотности тока;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

В зависимости от типа источника магнитного поля (постоянный магнит, электромагнит) необходимо задать соответствующие граничные условия для уравнений Максвелла.

#### 5. Модель формирования покрытия

Для описания формирования покрытия необходимо учитывать процессы столкновения частиц с подложкой и деформации частиц при ударе. При столкновении частицы с подложкой происходит ее деформация, сопровождающаяся нагревом и возможным плавлением в локальных областях контакта. Учет этих процессов требует использования сложных моделей термомеханического деформирования, которые, как правило, требуют больших вычислительных ресурсов.

В упрощенном подходе можно использовать критерии прилипания частиц к подложке, основанные на сравнении кинетической энергии частицы и энергии адгезии. Если кинетическая энергия частицы превышает энергию адгезии, то считается, что частица прилипает к подложке и формирует покрытие.

Толщина формирующегося покрытия может быть оценена на основе плотности потока частиц, достигающих подложки, и времени напыления.

## 6. Методы решения и граничные условия

Для решения представленной математической модели применяются численные методы. Для решения уравнений, описывающих процесс ХГН в магнитном поле, обычно используются численные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных объемов (МКО) и метод дискретных элементов (МДЭ). Уравнения газовой динамики решаются с использованием МКО или МКЭ. Для учета взаимодействия частиц с подложкой используется МДЭ. Для решения уравнений электромагнитного поля используется МКЭ или метод граничных элементов. Важно отметить, что решение уравнения магнитного поля может быть проведено предварительно и использовано в качестве входных данных для расчета движения частиц. Для интегрирования уравнений движения частиц используется метод Рунге-Кутты.

Граничные условия для газовой фазы задаются на входе в сопло, на стенках сопла и на выходе из сопла. На входе задаются значения давления, температуры и скорости газа. На стенках сопла задается условие прилипания (скорость равна нулю) и условие постоянной температуры. На выходе из сопла задается условие нулевого градиента давления. Для дискретной фазы задаются начальные условия, включающие в себя координаты, скорость и заряд каждой частицы.

Численная модель процесса ХГН в магнитном поле включает следующие этапы:

Таблица 1. Структура численной модели процесса ХГН в магнитном поле

№	Этап	Содержание
1	Построение расчетной сетки	Дискретизация области напыления на конечные объемы или элементы.
2	Решение уравнений газовой динамики	Определение распределения скорости, давления и плотности несущего газа в области напыления
3	Решение уравнений движения частиц	Расчет траекторий частиц, движущихся в газовом потоке под действием аэродинамических и магнитных сил
4	Определение параметров покрытия	Оценка толщины, плотности и адгезии покрытия на основе траекторий и скоростей частиц, ударяющихся о подложку

## 7. Результаты моделирования и их обсуждение

Представленная математическая модель позволяет исследовать влияние различных параметров на процесс ХГДН в магнитном поле, таких как скорость газа, размер частиц, температура газа, индукция магнитного поля и заряд частиц. Результаты моделирования показывают, что магнитное поле оказывает существенное влияние на траектории движения частиц, что позволяет управлять их осаждением на подложку. В частности, можно добиться увеличения эффективности осаждения и улучшения однородности покрытия. Модель позволяет оптимизировать параметры процесса ХГДН для получения покрытий с заданными свойствами. Например, можно определить оптимальную величину магнитного поля, при которой достигается максимальная эффективность осаждения. Также можно исследовать влияние заряда частиц на их траекторию и на качество получаемых покрытий. Результаты моделирования могут быть использованы для оптимизации параметров процесса ХГН в магнитном поле с целью получения покрытий с заданными свойствами.

## 8. Перспективы дальнейших исследований

В дальнейшем планируется усовершенствовать модель путем учета следующих факторов: влияние частиц на газовую фазу (двустороннее взаимодействие); влияние температуры частиц на их динамику; учет полидисперсности порошка (различный размер частиц); моделирование процесса соударения частиц с подложкой и формирования покрытия; разработка более точных моделей для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления; учет турбулентности газовой фазы. Эти усовершенствования позволяют получить более точное и адекватное описание процесса ХГДН в магнитном поле и расширить область применения модели для решения различных практических задач.

## 9. Заключение

В данной работе представлена математическая модель холодного газодинамического напыления в магнитном поле. Модель основана на трехфазном подходе и учитывает взаимодействие между газовой фазой и дискретной фазой, состоящей из порошковых частиц. Результаты моделирования показывают, что магнитное поле оказывает существенное влияние на динамику частиц, что позволяет управлять процессом осаждения и улучшать качество получаемых покрытий. Представленная модель может быть использована для оптимизации параметров процесса ХГДН и для разработки новых технологий нанесения покрытий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов, И. А. Холодное газодинамическое напыление покрытий / И. А. Козлов, К. А. Лещев, А. А. Никифоров, С. А. Демин – Текст непосредственный // ТРУДЫ ВИАМ. – 2020. - №8 (90). С. 77-93.
2. Поляков С. В. Суперкомпьютерное молекулярное моделирование газодинамического напыления наночастиц на подложку / С. В. Поляков, В. О. Подрыга, Д. В. Пузырьков, Т. А. Кудряшова - Текст электронный // Суперкомпьютерные дни в России. - 2018. – С. 782-792.
3. Клинков, С. В. Сравнение результатов экспериментов и моделирования холодного газодинамического напыления за маской. Часть 2 / С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, Н. С. Ряшин - Текст непосредственный // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т.24, №2 - С. 221-232.
4. Яковенко, И. С. Оптимизация процесса холодного напыления металлов для аддитивных технологий / И. С. Яковенко, А. Л. Котельников, А. Д. Киверин - Текст непосредственный // Вестник ОИВТ РАН. 2022. - №8. - С. 22-27.
5. Математическое моделирование процесса холодного газодинамического напыления порошковых цветных металлов / Е. Г. Бодров, И. С. Серебряков, Ю. С. Лат-фулина, Е. Д. Напримерова, В. А. Мясоедов, М. Н. Самодурова – Текст непосредственный // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. - 2023. - Т.21. №4. - С. 148-156.
6. Матвиенко, С. А. Повышение кавитационной стойкости гильз цилиндров форсированных дизелей / С. А. Матвиенко, А. М. Гончаров – Текст непосредственный // Инженер. – 2024. - №1(37). – С. 56-59.
7. Шехтман А. М. Газодинамические функции реальных газов: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1988.-175 с.
8. Бояршинов, М. Г. Решение системы уравнений Эйлера для установившегося течения идеального газа из точечного источника / М. Г. Бояршинов - Текст непосред-

ственний // Вестник Челябинского государственного университета. - 2010. - №24(205). - С. 5–8.

9. Александров, Д. В. Введение в гидродинамику: [учеб. пособие] / Д. В. Александров, А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Искакова. - Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2012. - 112 с.

10. Тарасов В. Н., Бояркина И. В., Коваленко М. В., Федорченко Н. П., Фисенко Н. И. Теоретическая механика. - М., ТрансЛит, 2012. — ISBN 978-5-94976-455-8. - с. 249.

Поступила в редакцию 21.03.2025 г.

**А. Н. Михайлов**, д-р техн. наук, проф., **С. Б. Котляров**, аспирант, **В. Б. Котляров**, аспирант, **Б. С. Котляров**, канд. техн. наук.

Донецкий национальный технический университет, ДНР, Россия

Тел: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 70-45-362;

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

## К ВОПРОСУ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛОВОЗОВ

В настоящей работе описаны результаты проведенных исследований вопросов формирования геометрии и поверхностных свойств деталей тепловозов, заданных согласно требованиям КД (конструкторской документации), достигаемые с применением функционально-ориентированных технологий (ФОТ) путем применения методов холодной объемно-поверхностной деформации. Приведены данные, позволяющие оценить перспективность предложенного способа проведения работ по восстановлению работоспособности и увеличению ресурса межремонтной эксплуатации маслоохладителей маневровых тепловозов путем применения технологии холодной объемно-поверхностной деформации материала при оребрении медных труб с целью увеличения теплообменной поверхности. Установлен алгоритм поиска оптимальных схем формирования эксплуатационных свойств функционально значимых поверхностей, относящихся к частям, участкам, зонам, микрозонам и нанозонам деталей, на основе итеративного рекуррентного выбора оптимального способа функционально-ориентированного технологического воздействия из определенного множества ФОТ.

**Ключевые слова:** медная труба, оребрение, часть, участок, зона, ФОТ-воздействие, формирование профиля, пластичность, износостойкость, ХОППД (холодная объемно-поверхностная пластическая деформация).

**A. N. Mihailov, S. B. Kotliarov, V. B. Kotliarov, B. S. Kotlyarov**

## ON THE QUESTION OF EXPANDING THE APPLICATION SCOPE OF FOT IN THE REPAIR PRODUCTION OF SPECIFIC PARTS OF DIESEL LOCOMOTIVES

*This paper describes the results of the studies conducted on the formation of geometry and surface properties of diesel locomotive parts, specified according to the requirements of the CD design documentation, achieved with the use of functionally oriented technological technologies (FOT) by applying methods of cold volumetric-surface deformation. The data are presented to assess the prospects of the proposed method of carrying out work to restore operability and increase the service life of oil coolers of shunting locomotives by applying the technology of cold volumetric-surface deformation of the material when finning copper pipes in order to increase the heat exchange surface. An algorithm is established for searching for optimal schemes for the formation of operational properties of functionally significant surfaces related to parts, sections, zones, microzones and nanozones of parts, based on iterative recurrent selection of the optimal method of functionally oriented technological impact from a certain set of photos.*

**Keywords:** copper pipe, finning, part, section, zone, PHOTO-impact, profile formation, plasticity, wear resistance, CVSPD (cold volume-surface plastic deformation).

### 1. Введение

Рассмотренные ранее [1, 2] аспекты применения функционально-ориентированных технологий (ФОТ) при изготовлении продукции машиностроения, в частности, при обработке деталей машиностроительного профиля, начиная от формирования заготовки до осуществления финишных операций, следует дополнить более подробным описанием возможностей выполнения малоотходных и безотходных технологических процессов. В качестве примера для рассмотрения приводится применение безотходной технологии формирования геометрии и поверхностных свойств деталей – трубы маслоохладителей маневровых тепловозов. Эскиз такой трубы приведен на рис. 1.

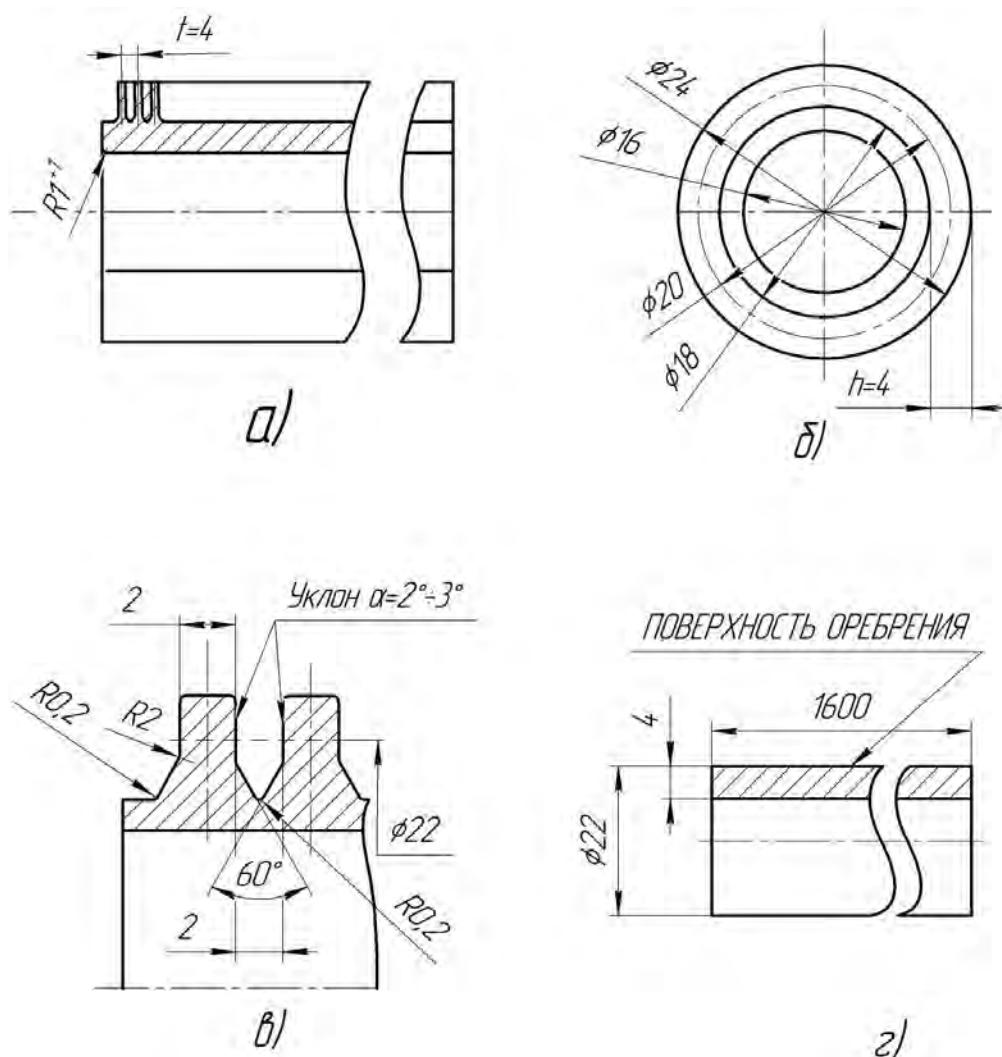


Рисунок 1. Эскиз оребренной медной трубы маслоохладителя тепловоза  
 а) общий вид трубы с винтообразным оребрением; б) торцевые размеры оребрения;  
 в) профиль ребер оребренной трубы; г) изначальная труба для оребрения.

## 2. Цель и задачи

Целью данной статьи является подтверждение актуальности процесса ФОТ-воздействия для безотходной обработки оребренной трубы для маслоохладителей гидропередач двигательных установок маневровых тепловозов серий ТЭМ и ТГМ. При этом следует рассмотреть в первом приближении различные методы формирования требуемого профиля и определить критерии выбора лучшего варианта обработки.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Обосновать актуальность изготовления оребренных труб для маслоохладителей гидропередач маневровых тепловозов.
2. Провести укрупненный анализ возможных способов формообразования для создания геометрического профиля труб маслоохладителей.
3. Выделить существенные конструктивно значимые признаки оребренных труб, являющиеся функционально значимыми при эксплуатации.

4. Установить укрупненную взаимосвязь между конструктивно значимыми функциональными признаками труб и технологическими признаками ФОТ-воздействий при помощи принятого инструментального обеспечения.

5. Установить зоны локализации элементов и конструктивных атрибутов трубы и элементов инструментального обеспечения – накатных роликов.

### 3. Основное содержание

Функциональное назначение такой трубы – передача излишнего тепла, нагретого в процессе работы масла, циркулирующего в системе гидропередачи и контактирующего с наружной поверхности трубы, охлаждающей жидкости – воде, циркулирующей по внутреннему объему трубопровода. Максимально эффективное выполнение возложенной функции маслоохладителя возможно при максимальном коэффициенте передачи тепла, зависящего от материала трубы и от площади поверхности, по которой осуществляется соприкосновение масла с наружной поверхностью трубы.

Очевидно, что требуется увеличивать контактную поверхность трубы с разогретым маслом. Это возможно за счет развития наружной поверхности трубы. Чаще всего это увеличение поверхности происходит за счет создания ребер на труbe. Таким образом, наиболее функционально значимым элементом трубы маслоохладителя является наружная поверхность с развитым оребрением. При этом принципиально ребра внешней поверхности могут выполняться как продольными, так и поперечными или винтовыми. На рис. 1 представлен эскиз медной трубы маслоохладителя с винтовым оребрением. Вид в плане рис. 1а и вид с торца рис. 1б отражают общие размеры оребренной трубы. На рис. 1в отображены параметры профиля ребер, а на рис. 1г приведены размеры трубы-заготовки.

Очевидно, что целесообразность выбора приемлемой технологии изготовления труб для теплообменников тепловозов включает в себя решение задач экономичности при выборе ФОТ, как было показано ранее [3, 4, 5], на различных этапах производства:

- выбор заготовки с учетом структуры материала;
- выбор структурной схемы и метода формообразования требуемой геометрии профиля;
- выбор ФОТ формирования поверхностных свойств теплообменных труб.

Материалы труб и их общая геометрия для теплообменных аппаратов хорошо изучены [6, 7 и др.], однако процессы их формирования и некоторые технологические аспекты изготовления имеют особенности, влияющие на общий характер теплообмена. Это происходит вследствие того, что в зависимости от применяемой ФОТ может меняться взаимное расположение элементов и их форма (профиль и геометрические параметры профиля труб), а также шероховатость поверхности. Этот факт в той или иной мере способствует или противоречит сохранению ламинарного потока омывающего трубу разогретого масла и может снижать коэффициент теплопередачи от рабочей среды к поверхности теплообменника в процессе эксплуатации [5, 6].

Так, например, оребренная труба может быть изготовлена литьем, горячей или холодной штамповкой с применением прессов. А можно ребра точить из цельной толстостенной трубы. В первом случае это очень эффективный процесс, который можно организовать при массовом производстве из-за высокого уровня первоначальных затрат на оборудование, логистику и т.д., что возможно при большой массе изготавляемой продукции. Случай механической обработки из толстостенной трубы может быть применим при индивидуальном изготовлении единичных образцов.

При этом имеет место большой перерасход материала, требуемого утилизации. В случае серийного производства или изготовления труб определенными значимыми партиями следует искать выход в применении малоотходных или безотходных технологий формообразования профиля и формирования поверхностных свойств оребренных труб.

Принципиально возможным способом реализации такой безотходной технологии является способ накатки ребер на поверхности трубы из материала самой заготовки трубы с расчетной толщиной стенки. При этом необходимо соблюдать принцип соответствия функционального назначения деталей, элементов, зон и микрозон элементов и частей детали технологическим особенностям функционально-ориентированных технологических воздействий (ФОТ-воздействий) достижения заданных конструкторской документацией параметров и требований, предъявляемых к готовой детали [5].

С учетом изложенного ранее материала можно записать функционал трубы в виде конъюнкции частных функционалов формообразования, поверхности и материала трубы:

$$\Phi_{\sum j}^{\Phi} = \Phi_{j1}^{\Phi} \cap \Phi_{j2}^{\Phi} \cap \dots \cap \Phi_{jt}^{\Phi}, \quad (1)$$

где  $t$  – количество конечных элементов ( $t=1, 2, 3, \dots, t$ ), образующих геометрическую форму с заданными размерами  $j$ -ой детали механизма.

При этом каждая из частных функций  $\Phi_j$  состоит из множества подфункций на каждом уровне по глубине технологического проявления:

$$\Phi_j^\Phi = \Phi_{j(l-k)}^{\Phi^1} \cap \Phi_{j(l-r)}^{\Phi^2} \cap \Phi_{j(l-i)}^{\Phi^3} \cap \Phi_{j(l-m)}^{\Phi^4} \cap \Phi_{j(l-n)}^{\Phi^5} \cap \Phi_{j(l-t)}^{\Phi^6} \cap \Phi_{j(l-s)}^{\Phi^7}, \quad (2)$$

где индексы верхние  $\Phi^{l-\Phi^7}$  при символе  $\Phi^{\Phi^{l-\Phi^7}}$  обозначают номер уровня по глубине проявления функции, а нижние индексы обозначают количество возможных частей, участков и зон на каждом рассматриваемом уровне формообразования  $j$ -ой детали из всего множества.

Объединение формул (2) и (3) дают в результате формулу (1), а мощность множества  $N^\Phi$  функционала (1) определяется мощностями подмножеств (2) и (3).

В частный функционал по структуре материала должны входить функции обеспечения минимального значения предела текучести, высокой степени вязкости, минимальной твердости, высокой теплопроводности и некоторые другие. Указанным требованиям соответствует материал трубы – медь.

Функционал по обеспечению требований к поверхностному слою включают те показатели, которые способствуют формированию низкой твердости и высокой чистоте поверхностного слоя трубы, чему также соответствует медь. Запись аналога функционала формирования поверхностных свойств аналогична выражению (1):

$$\Phi_{\Sigma j}^{\Pi} = \Phi_{j1}^{\Pi} \cap \Phi_{j2}^{\Pi} \cap \dots \cap \Phi_{jt}^{\Pi}, \quad (4)$$

где верхний индекс  $\Pi$  при символе  $\Phi$  означает принадлежность к функционалу поверхностных свойств формируемой поверхности.

Функционал геометрии, формы и размеров профиля трубы должен обеспечивать достаточную прочность элементов детали при минимальных усилиях изменения размеров элементов и перемещения объемов металла из одних в другие. Функционал свойств материала в заданной зоне участка записывается выражением аналогично (4), но верхний индекс  $M$  при символе  $\Phi$  означает принадлежность к способу формирования структуры и свойств материала детали:

$$\Phi_{\Sigma j}^M = \Phi_{j1}^M \cap \Phi_{j2}^M \cap \dots \cap \Phi_{jt}^M, \quad (5)$$

Дополнительно к проведенным ранее исследованиям по синтезу структурных схем формирования поверхностных свойств обрабатываемых деталей, в частности чистоты и шероховатости поверхностей согласно требованиям КД, на основе принятых к осуществлению функционально-ориентированных технологических воздействий, выполнен синтез структурных схем формирования поверхностных свойств, повышающих эксплуатационные характеристики оребренных труб маслоохладителей тепловозов.

Важным моментом для эксплуатации труб и формирования профиля ребер является форма и расположение ребер относительно поверхности основного тела трубы. Если принять более простое в изготовлении направление расположения ребра перпендикулярно оси трубы, то будет увеличена вероятность проявления турбулентности потока при обтекании горячего масла вокруг теплопередающей поверхности маслоохладителя. При этом изменяются условия теплопередачи при контакте масла с трубой и нарушаются расчетные параметры охлаждения масла в маслоохладителе, что приводит к нарушению режима эксплуатации агрегатов.

Ламинарное течение потока масла обеспечивается расположением ребер трубы по винтовой направляющей на поверхности трубы. На рис. 1 приведены реальные размеры оребренной медной трубы и размеры профиля ребер по высоте и боковым поверхностям, для которых в настоящей работе излагаются результаты проведенных исследований.

Общая схема оребрения медной трубы представлена на рис. 2.

Краткое описание элементов и особенностей приведенной на рис. 2 принципиальной схемы накатки винтового ребра на цельной медной труbe с применением 3-х роликов, размещенных на осях, установленных с угловым смещением на угол  $\beta$  относительно оси подлежащей оребрению трубы. Устройство позволяет применить его с токарно-винторезным станком 1К62, установив в штатном патроне, а подлежащая обработке труба пропускается через переднюю бабку. Осевая подача трубы осуществляется с помощью суппорта, на котором закрепляется толкателем. Величина осевой подачи трубы согласуется с подъемом винтовой линии, зависящей от шага винтовой линии ребер.

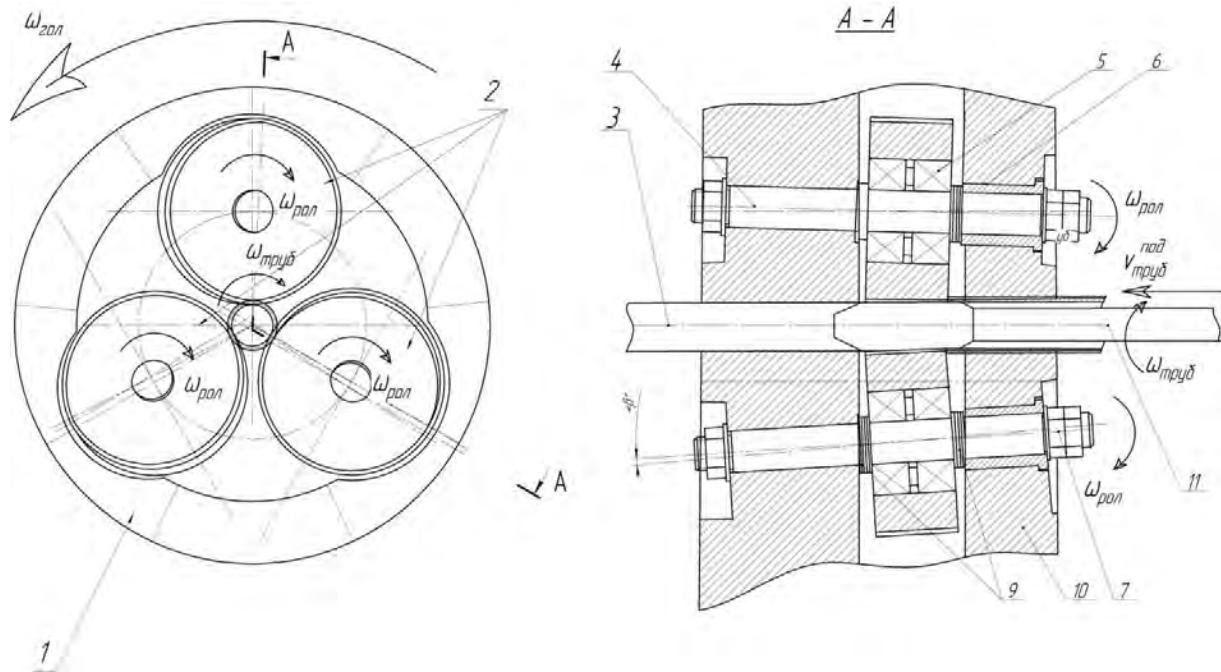


Рисунок 2. Схема оребрения труб роликовой головкой.

Общее конструктивное устройство включает в себя три цилиндрических ролика поз 2, снабженных профилем для формирования ребер, установленных в корпус поз 1 на осях поз. 4. Оси установлены с угловым смещением  $\beta$  в плоскости, параллельной оси трубы поз. 3, но смещенной на величину радиуса накатного ролика поз. 2 относительно точки контакта с трубой в точке формирования профиля ребра. Ролики на оси 4 устанавливаются на радиальных роликовых подшипниках поз. 5, а осевое положение по отношению к опорным поверхностям корпуса регулируется шайбами поз. 9. Другой конец оси. 4 устанавливается через втулку поз 6 в крышку поз. 9 и фиксируется с помощью крепежных элементов поз. 7. Дополнительно к приведенной схеме на станке устанавливается дрель поз. 11, закрепленный в пиноли задней бабки станка.

Таким образом головка обеспечивает накатку винтовой линии ребер на основное тело трубы с постоянной высотой ребер.

В качестве накатных роликов для оребрения использованы стандартные резьбонакатные ролики М4, доработанные под нужный профиль ребер маслоохладителя путем шлифования канавок.

Схема доработки накатных роликов с исходными размерами и с размерами профиля для накатки после доработки приведена на рис. 3.

Габаритные размеры и вершины зубьев профиля изменениям не подвергались, но изменение профиля осуществлено путем шлифования впадин имеющегося профиля.

Связь конструктивно-эксплуатационного функционала профиля обрабатываемой трубы и технологического функционала профиля накатного ролика осуществляется путем соответствующего профилирования с учетом кинематических факторов структурной схемы обработки. Схема приведения конструктивного функционала трубы и функционала инструментально-технологического воздействия поясняется на примере на рис. 4а, б, в.

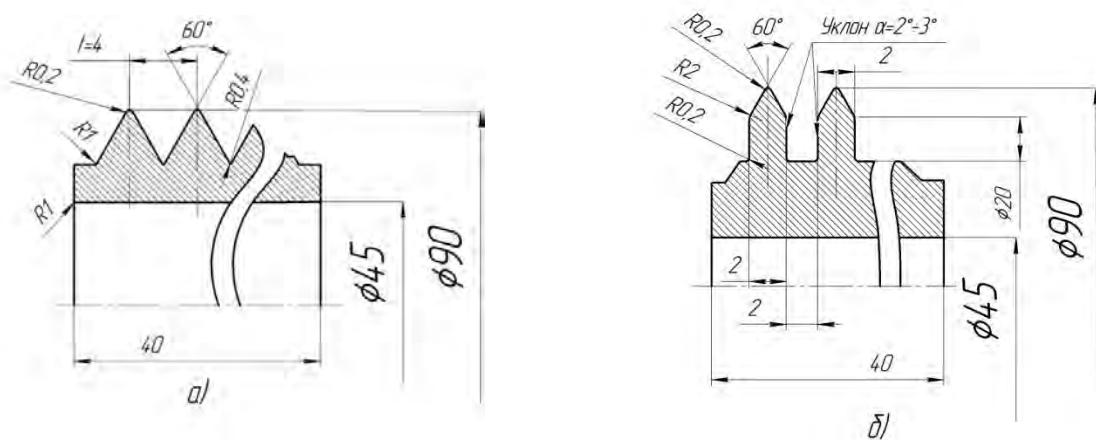


Рисунок 3. Вариант доработки ролика накатного для оребрения медной трубы.

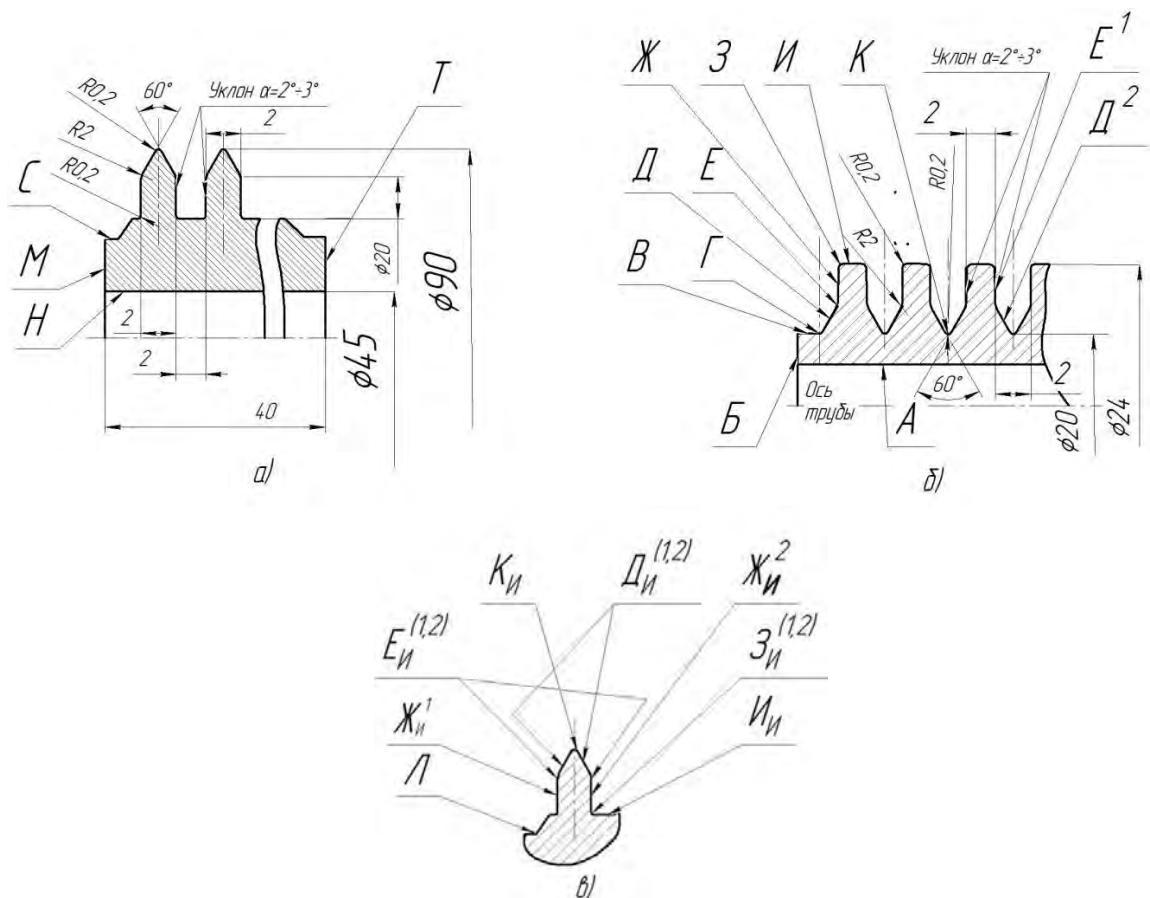


Рисунок 4. Пояснение к порядку установления взаимосвязи конструктивных признаков детали и значимых технологических элементов их формирования:

- а) размеры геометрических элементов ребер трубы; б) обозначение значимых конструктивных элементов трубы буквами русского алфавита; в) обозначение элементов инструмента технологической системы – поверхностей накатного ролика, соответствующих конструктивным элементам обрабатываемой трубы.

В соответствии с разработанной ранее системой [1] установления взаимосвязей конструктивных атрибутов детали и технологических атрибутов обрабатывающей технологической системы все поверхности детали обозначаются буквами русского алфавита с индексами для аналогичных поверхностей разных участков детали. На рис. 4б обозначены буквами поверхности ребер трубы, размеры которых приведены на рис. 4а. На рис. 4в буквами русского алфавита с индексами обозначены поверхности инструмента, которые принимают участие в формировании соответствующих буквенным обозначениям элементов ребер трубы. Индекс «И» означает отношение элемента и обозначения к инструменту (в данном примере к накатному ролику), а числовые верхние индексы означают отношение к аналогичным и зеркально расположенным поверхностям.

Поверхности А и Б не подвергаются инструментальному воздействию. А поверхности от В до Е с учетом всех переходных радиусных элементов и скруглений как раз подвергаются формирующему воздействию роликов. При этом в процессе образования ребристой винтовой поверхности трубы ролики накатной головки совершают вращательные движения вокруг своих осей, расположенных под скрещивающимися углами  $3^\circ$  относительно центральной оси самой головки, совпадающей с осью трубы. Угол  $3^\circ$  соответствует подъему винтовой линии ребер с шагом 4мм. Медная труба в процессе оребрения также вращается вокруг собственной оси под воздействием сил трения между боковыми и торцевыми поверхностями накатных роликов и формируемой поверхности самой трубы, а осевая подача трубы на винтовой шаг – 4 мм/об, осуществляется с помощью суппорта станка. Подача устанавливается по нониусу суппорта, а вращение патрона, на котором устанавливается накатная головка с тремя роликами, осуществляется с минимальным числом – 12 об/мин.

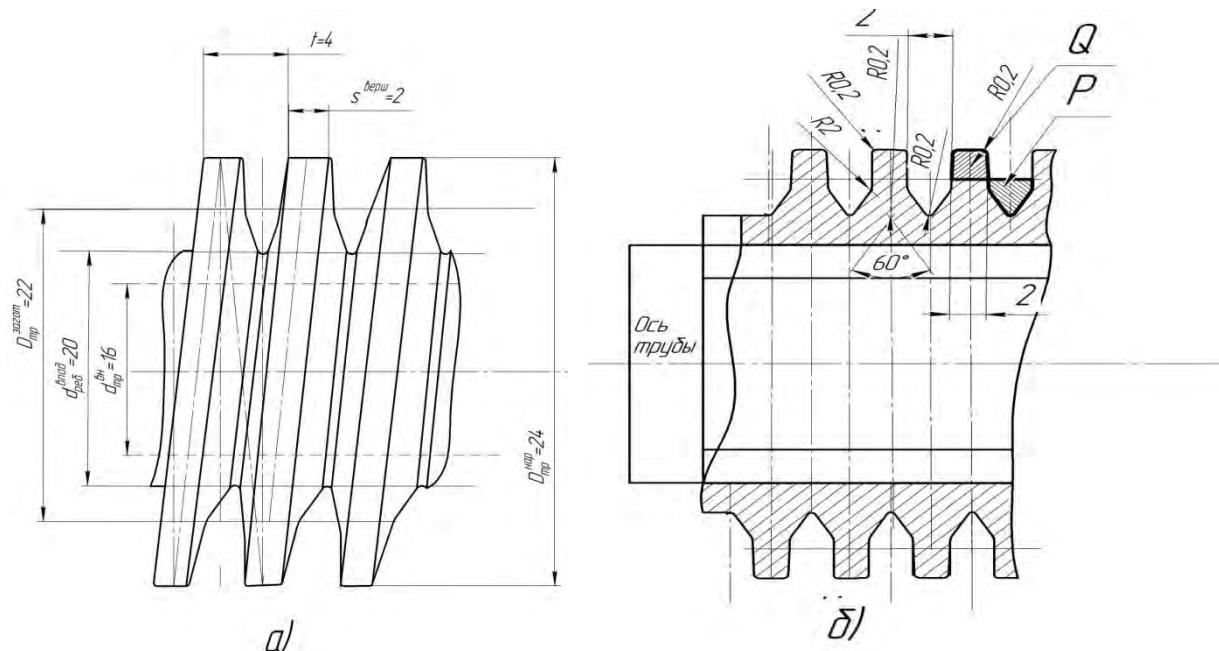


Рисунок 5. Эскиз профиля, обеспечивающего перемещением объемов металла.  
а) вид готового профиля оребренной трубы в плане; б) сечение профиля с указанием замещаемых объемов при перемещении металла.

Правильная форма ребер трубы образуется за счет точного расчета перемещаемых объемов металла, как проиллюстрировано на рис. 5а, б. На рис. 5а иллюстрируется профиль ребер при виде в плане. Просматривается характерная кривизна боковой поверхности ребер, обеспечивающая минимизацию трения формирующих поверхностей при вращении роликов о поверхность металла формируемого профиля ребер. Указан наружный диаметр трубы-заготовки  $D=22$  мм, а также наружный диаметр оребренной трубы  $D=24$  мм, и диаметр впадин оребренной трубы  $D=20$  мм, а также внутренний диаметр заготовки и готовой трубы  $d=18$ мм.

На рис. 5б показан расчетный профиль ребер. При этом обозначен литерой  $P$  кольцевой объем  $V_P$  заготовки трубы, который при формировании ребер занимает кольцевой объем  $V_Q$ , обозначенный литерой  $Q$ . Условием успешного формообразования оребренной поверхности трубы и правильная геометрия ребер, соответствующая расчетам, является равенство кольцевых объемов металла  $P$  и  $Q$ , т.е.,  $V_Q = V_P$ .

В случае  $V_Q > V_P$  за счет недостатка металла для формирования профиля могут проявляться раковины и вырванные участки на боковых поверхностях и вершинах ребер, а также недостаточная чистота поверхности.

При  $V_P > V_Q$  образуется излишний металл при формировании профиля, который не может быть утилизирован в процессе накатки, что также приводит к ухудшению качества геометрии и поверхности оребренной трубы, к появлению задиров и наплыков на поверхности, а также является причиной возможных поломок накатной головки.

Обработанная таким образом оребренная труба имеет достаточно высокие показатели качества поверхности – шероховатость не более  $Rz 0,02$  мм. Наружная поверхность ребер и впадин при этом имеет упрочненный слой глубиной до 0,2 мм.

В большинстве случаев производства эксплуатационные свойства деталей определяются в процессе формирования геометрии, формы деталей [1, 2] с заданными размерами и поверхностью, обладающей определенными качественными показателями.

Расчетные параметры инструментов для каждого типоразмера труб определяются в каждом случае в зависимости от диаметров труб, наружных диаметров оребренной поверхности, толщины и высоты самих ребер. Диаметр трубы как заготовки для обкатки рассчитывается исходя из указанных требований к готовой детали, и расчет ведется с учетом перемещаемого объема путем вытеснения металла из одной зоны в другую. Описание порядка расчета требует изложения в отдельной работе.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования и результаты, изложенные в настоящей работе, позволили достичь поставленной цели и решить ряд следующих задач:

1. Приведены актуальные доводы в пользу необходимости изготовления оребренных труб для маслоохладителей двигательных агрегатов маневровых тепловозов методом накатки цельных медных труб.

2. Проведен укрупненный анализ возможных способов формообразования для создания геометрического профиля труб маслоохладителей, включая сравнительные способы метода накатки с применением плашки, и с применением накатной головки.

3. Установлены и приведены существенные конструктивно значимые признаки оребренных труб, являющиеся функционально значимыми при эксплуатации.

4. Установлен принципиальный укрупненный характер взаимосвязей между конструктивно значимыми функциональными признаками труб и технологическими признаками ФОТ-воздействий при помощи принятого инструментального обеспечения.

5. Установлены зоны локализации элементов и конструктивных атрибутов трубы и элементов инструментального обеспечения – накатных роликов с выделением формообразующих поверхностей роликов.

Таким образом, подтверждена актуальность разрабатываемой темы формирования оребрения труб маслоохладителей из цельной медной трубы методами холодной объемно-поверхностной деформации. При этом заложены основы для исследований и разработки научно-технической основы создания функционально-ориентированных технологий для изготовления деталей машиностроительной области с применением безотходных и малоотходных технологических процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А. Н. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 3 (70). С. 22-33. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
2. Михайлов А. Н. Предпосылки создания новой схемы механической зубчатой КПП с переключением без разрыва потока передаваемой мощности / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 2 (69) 2020. С. 50-62. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
3. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. Донецк, ДонНТУ, 2009. -346с.
4. Михайлов А. Н. Синтез структурных схем функционально-ориентированного технологического воздействия при формообразовании и формировании поверхностных свойств деталей КПП / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2021. Вып. 2 (73). С. 53-67. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
5. Михайлов А. Н. Анализ деталей по функциональным признакам участков и зон согласно уровню и глубине технологического обеспечения целевой функции / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – Вып. 1 (76). – С. 43-52. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
6. Аронсон К.Э. Теплообменники энергетических установок: учебник для вузов / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин [и др.]; по общей ред. Д-ра техн. Наук, проф. Ю.М. Бродова. 2-е изд. перераб. и доп. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 817с.
7. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1979, 416 с.

Поступила в редакцию 10.03.2025 г.

**А. Н. Михайлов**, д-р техн. наук, проф., **В. Б. Котляров**, аспирант, **С. Б. Котляров**, аспирант, **Б. С. Котляров**, канд. техн. наук.

Донецкий национальный технический университет, ДНР, Россия

Тел: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 70-45-362;

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

## ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗУБЬЕВ КПП БЕЗ РАЗРЫВА ППМ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НАПЫЛЕНИЕМ

*В настоящей работе описаны результаты исследований, касающихся способов формирования поверхностных свойств поверхностей модифицированных зубьев, которые относятся к специфическим зонам переключения передач блок-вала колес. Рассматривается способ технологического обеспечения обработки зубьев на предварительной стадии подготовки рельефной поверхности подложки, предшествующее нанесению твердого покрытия методом вакуумного ионно-плазменного напыления твердых металлов.*

**Ключевые слова:** деталь, часть, участок, зона, обрабатываемая поверхность зубьев, формообразование, фрезерование, покрытие, напыление.

**A. N. Mihailov, V. B. Kotliarov, S. B. Kotliarov, B. S. Kotlyarov**

### PREPARATION OF SURFACES OF MODIFIED GEARBOX TEETH WITHOUT RUPTURE OF PPMS FOR APPLICATION OF WEAR-RESISTANT COATINGS BY SPRAYING

*This paper describes the results of studies on methods for forming the surface properties of the surfaces of modified teeth, which relate to specific shift zones of the wheel block. A method of technological support for the processing of teeth at the preliminary stage of preparation of the relief surface of the substrate, prior to the deposition of a hard coating by the method of vacuum ion-plasma spraying of hard metals, is considered.*

**Keywords:** detail, part, section, zone, treated tooth surface, shaping, milling, coating, spraying.

#### 1. Введение

Качество изготовления машиностроительных изделий определяется качеством технологического обеспечения требований к входящим в сборку деталям. Качество самих деталей при этом определяется возможностью достижения требуемых в КД (конструкторской документации) показателей к точности геометрии, и в большой степени требований к свойствам поверхности в заданных пределах локализации [1, 2, 3].

Для детали типа блок-вал колес КПП (коробки переключения передач) без разрыва ППМ (потока передаваемой мощности) определяющим показателем качества, помимо общей геометрии и точности относительного положения частей и элементов, является реализация в допустимых полях отклонений формы зубьев в модифицированном исполнении по формообразованию и по поверхностным свойствам с указанием точной локализации модифицированных участков поверхностей зубьев [4, 5].

В настоящей работе приводятся результаты исследований формообразования модифицированных зубьев на участках зубчатых венцов в угловых секторах, включающих те зубья, которые в одновременном зацеплении с ведущей шестерней, переключает ступень передачи. Для обеспечения требуемых характеристик зубьев и элементов блок-вала разработан порядок и приспособления, позволяющие подготовить поверхность зубьев для финишной обработки и отделки.

## 2. Цель и задачи

Целью исследований настоящей работы является разработка порядка действий, описание результатов разработки и применения дополнительных приспособлений и инструментов, обеспечивающих форму модификации и параметры модифицированной боковой поверхности зубьев блок-вала колес, позволяющих нанести твердое покрытие

методом многослойного вакуумного ионно-плазменного напыления нитрида титана. Достижение поставленной цели обеспечивается решением ряда следующих задач:

1. Выбор способа подготовки боковой поверхности и обеспечения рельефа зубьев методом механической обработки после черновой операции формообразования для последующего нанесения твердого покрытия многослойным напылением.

2. Разработка порядка осуществления процесса ФОТ-воздействия (функционально-ориентированного технологического воздействия) на участках с затрудненным доступом серийным инструментов на металлорежущих станках. Алгоритм операций подготовки поверхности под специальное покрытие.

3. Разработка кинематики относительных движений заготовки и исполнительных органов, обеспечивающих геометрию подготавливаемой поверхности.

4. Параметрический расчет исполнительных инструментов и режимов обработки, обеспечивающей требуемые характеристики поверхности.

## 3. Основное содержание

Вопросы формообразования для получения требуемой геометрии деталей ранее рассмотрены в работах автора. В настоящее работе уделено внимание подготовительной операции для обеспечения требуемого рельефа боковых поверхностей бочкообразных зубьев для нанесения многослойного неравномерного покрытия нитридом титана методом вакуумного ионно-плазменного напыления. Принципиально выбор способа подготовки боковых поверхностей зубьев для напыления блок-вала колес осуществляется согласно алгоритму, который является частью обобщенного алгоритма обработки блок-вала, приведенному на рис. 1.

После механической обработки на предварительных операциях и после чернового нарезания зубьев в дальнейшем осуществляется модификация зубьев венцом путем придания бочкообразности. Один способов образования бочкообразных зубьев блок-вала колес подробно рассмотрен ранее. Способы обработки шеек вала, посадочных, вспомогательных, иных поверхностей в настоящей работе опускаются. Обработка венцов рассматривается как операции по разным потокам процесса. Более подробно приводится алгоритм для операций, которые выполняются для потока среднего венца, рис. 1.

Множество возможных ФОТ-воздействий, с помощью которых можно достигать результатов в необходимых параметрах, включает различные способы формообразования и формирования свойств поверхностей. Методом рекуррентно-итеративного выбора для реализации принят способ электроэррозионной обработки. Этот выбор обусловлен такими факторами, которые определяют размерные параметры геометрически ограниченных контуров боковых поверхностей зубьев при одновременной возможности управлять в дальнейшем толщинами в любом из напыляемых слоев от первого до крайнего. Исходя из того, что все слои напыления по толщине имеют размеры, определяемые микронами, (что связано с высокой износостойкостью напыляемого материала), имеется легко осуществляемая

технологическая возможность управлять глубиной разделки для каждого слоя путем изменения режимов процесса. Величина заглубления площадки под каждый слой напыления может варьировать в пределах от 15 мкм до 300 мкм.

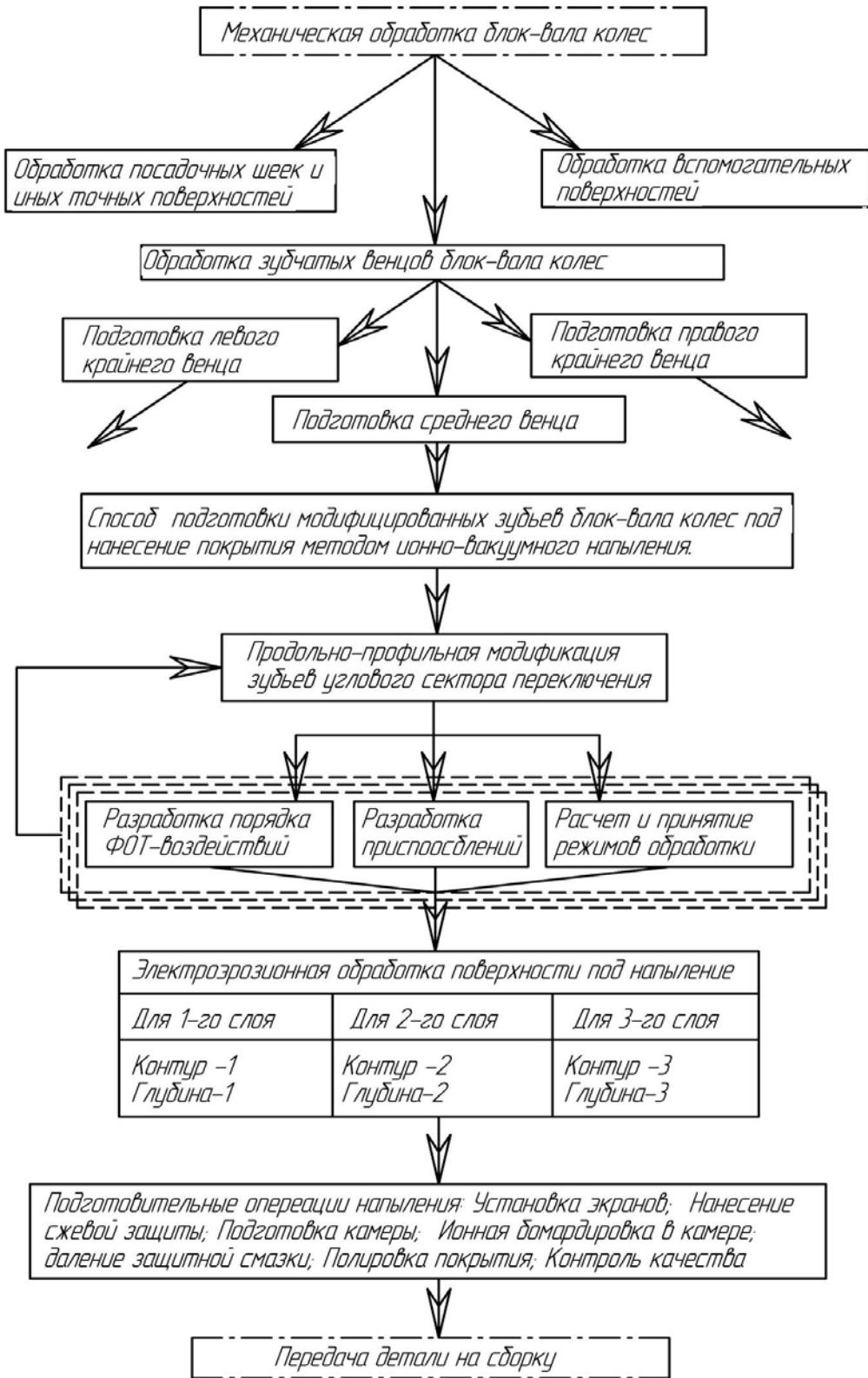


Рисунок 1. Алгоритм подготовки поверхности зуба под напыление.

Разрабатывается частный маршрутный техпроцесс для осуществления подготовительных операций в заданной координатной локализации под напыление с учетом предварительной разработки необходимого оснащения, инструментов и приспособлений. Задаются параметры режимов обработки на каждом технологическом переходе и проходе:

- для 1-го контура по первому слою;
- для 2-го контура по второму слою;
- для 3-го контура по третьему слою.

Следующий этап посвящается разработке технологической операции, собственно, по подготовке геометрически ограниченных участков боковых поверхностей зубьев венцов в однозначно определенных локализациях в системе координат блок-вала колес под процесс напыления. Подготавливается материал для защитных экранов по каждому слою напыления, а также материалы для нанесения сажевого покрытия для участков поверхностей, не подлежащих напылению твердыми материалами по каждому слою.

Порядок формирования рельефного основания на поверхностях бочкообразных зубьев блок-вала колес. Снятие излишков материала осуществляется в определенном порядке и последовательности, при которой послойное напыление наилучшим образом соответствует запланированной форме модификации поверхностей зубьев.

Последовательность порядка формирования профиля и иллюстрация контуров рельефных образований для послойного напыления с учетом локализации в их относительном расположении, приведена на рис. 2.

На рис. 2а приведен контур выборки материала для 1-го слоя напыления с указанием глубины выборки  $h1$ , при этом приведен весь порядок координатных систем от детали – блок-вала, до координатной системы для каждого зуба блок-вала колес. На последующих рисунках - 2б и 2в, указаны профили заглублений для 2-го и 3-го слоев с глубинами  $h2$  и  $h3$  соответственно. На этих рисунках указаны системы координат только самих зубьев, в которых можно фиксировать локализацию рельефных образований.

Явления, происходящие в межэлектродном промежутке, весьма сложны и являются предметом специальных исследований. Здесь же отметим, что будет рассмотрена простейшая схема удаления металла из области обработки посредством электрической эрозии. Производительность процесса зависит от величины энергии импульса и длительности воздействия импульса на электродах. Энергия импульса  $Ei$  может изменяться от 0,001 Дж до 2,0 Дж, а длительность импульса  $Ti$  при разряде от 9 мкс до 1500 мкс. При этом размеры лунки удаляемого материала могут варьироваться в пределах величин по глубине  $hk$  от 0,015 мм до 0,050 мм; по диаметру лунки  $dk$  от 0,1 мм до 2,0 мм; по объему удаляемого материала  $vk$  от 0,000078 мм<sup>3</sup> до 0,10 мм<sup>3</sup>.

Вариативность эффективности удаления материала заготовки при воздействии напряжением различной мощности и с различной длительностью воздействующего импульса позволяет регулировать процесс по производительности. При этом качество поверхности можно регулировать с тем, чтобы на нижних слоях можно оставлять более грубое качество поверхности, а для последних слоев можно снижать величину отклонений от номинального уровня, что соответствует снижению шероховатости поверхности.

Так для выполнения профиля 3-го слоя величина заглубления от поверхности с учетом двух верхних слоев может достигать абсолютной величины до 600-650 мкм.

Для формирования профиля по 2-му слою учитываем толщину 1-го слоя, и общая глубина профилирования может составлять 350 – 400 мкм. При этом профили 2-го и 3-го слоев выполняются при повышенной энергии импульса. Профилирование поверхностей под напыление 1-го слоя выполняется меньшей энергией и меньшей длительностью импульса при максимальной глубине прорабатываемого слоя до 150 мкм с минимальным объемом удаляемого материала за период воздействия единичного импульса. За счет такого регулирования интенсивности процесса обеспечивается максимальная эффективность ФОТ-воздействия.

Для профилирования боковой поверхности зуба под напыление надо применять свой профиль инструмента-катода для обработки каждого слоя. На рис. 3 приведены эскизы сечений для каждого слоя профиля и форма инструментов-катодов для обработки каждого слоя боковой поверхности. На рис. 3б, 3в, 3г показаны сечения для 1-го, 2-го и 3-го слоя профиля под напыление. На рис. 3д, 3е, 3ж приведены эскизы формы инструментов для электроэррозионной обработки для 1-го, 2-го и 3-го слоя под напыление боковой поверхности зуба.

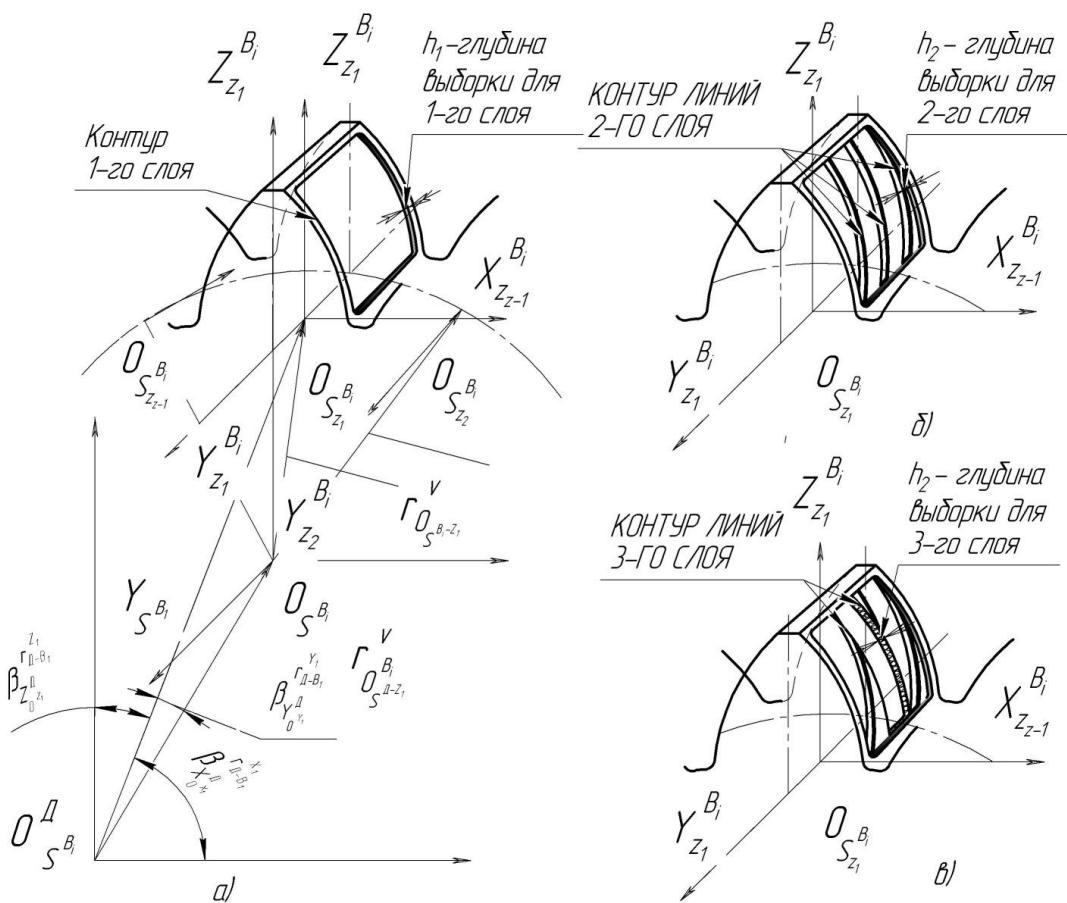


Рисунок 2. Подготовка профилей боковой поверхности зуба под напыление.

а) заглубление под профиль 1-го слоя напыления; б) заглубление под профиль 2-го слоя напыления; в) заглубление под профиль 3-го слоя напыления.

Указаны величины заглублений  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  по отдельности для каждого слоя обработанной поверхности. Для 2-го и 3-го слоя указана ширина сектора обработки  $S_1$  и  $S_2$ . Для электроэррозионной обработки (ЭЭО) 1-го слоя форма поверхности инструмента соответствует форме поверхности зуба по прилегающей бочкообразной поверхности.

На рис. 3а, 3з показан собственно профиль подготовленного для обработки бочкообразного зуба и сечение профилированного зуба под последующее напыление.

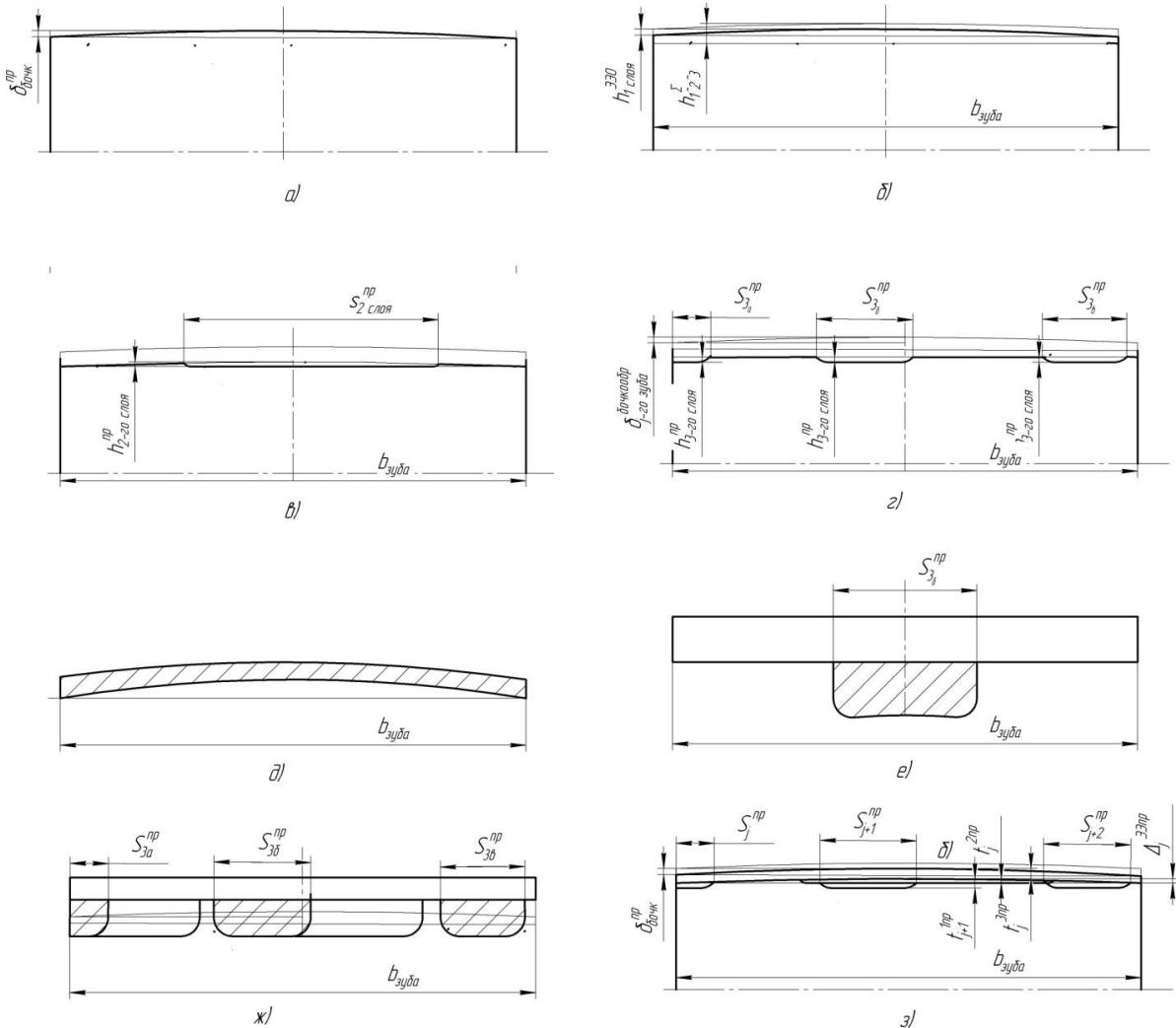


Рисунок 3. Профилирование боковой поверхности зубьев блок-вала колес:  
 а) профиль боковой поверхности бочкообразного зуба; б) профиль сечения выборки для 1-го слоя; в) профиль сечения выборки для 2-го слоя; г) профиль сечения выборки для 3-го слоя; д) профиль сечения электрода для 1-го слоя; е) профиль сечения электрода для 1-го слоя; ж) профиль сечения электрода для 2-го слоя; з) профиль сечения электрода для 3-го слоя.

Формальная запись каждой поверхности, подвергаемой обработке под напыление, отражает все признаки части детали в следующем виде:

$$Pj = F(X_{i(i=1,2, \dots, n)}^{Pj(j=A, B, \dots, Я)}, Y_{i(i=1,2, \dots, n)}^{Pj(j=A, B, \dots, Я)}, Z_{i(i=1,2, \dots, n)}^{Pj(j=A, B, \dots, Я)}), \quad (1)$$

где  $X_i^P, Y_i^P, Z_i^P$  являются функциями от  $X, Y, Z$  в частных системах координат частей от «А» до «Я» детали блок-вал [9]. При этом в правой части выражения (1)

выражена локализация поверхности по координатам общей координатной системы детали.

Функции технологической системы, отражающие функциональное наполнение ФОТ-воздействия по каждому отдельному слою формирования профиля под напыление может быть представлено следующим выражением,

$$T_{\sum_{i=1}^1}^{\Phi_{dem}} = f(T_{j^z_{(x,y,z)}}^{\phi_k^{v_i^p_{(x,y,z)} \omega_{x,y,z}^p}} \cap T_{n_{(x,y,z)}^z}^{\phi_k^{v_i^p_{(x,y,z)} \omega_{x,y,z}^p}}), \quad (2)$$

где  $T^\Phi$  является функцией координат  $X, Y, Z$  в системе координат обрабатывающего технологического комплекса. При этом в процессе формообразования каждая образующая точка однозначно соответствует тем точкам поверхностей обрабатываемой детали, которые отражены в выражении (2), и тогда формируемая поверхность  $\Phi^\Gamma$  может быть представлена в виде функционала функции поверхности  $\Pi_j$  детали (2) и функции движения формирующей точки  $T^\Phi$  инструмента.

Взаимовлияние функциональных признаков обрабатываемой поверхности детали и ФОТ-воздействия можно отразить в следующем виде

$$\Pi_{P_i^k}^{n_j} \xrightarrow[T]{\prod} T_{\sum_{i=1}^1}^{\Phi_{dem}} \cap T_{\sum_{i=1}^1}^{\Pi_{dem}}, \quad (3)$$

где в левой части представлена суть требований к обрабатываемой поверхности, а в правой части выражения (3) – суть ФОТ-воздействий, относящихся к формообразованию, и к формированию свойств поверхностей на каждом уровне профилирования участков напыления.

Принимая во внимание то обстоятельство, что обработка участков под нанесение покрытий поверхностей при подготовке боковых поверхностей зубьев осуществляется методом ЭЭО, кинематика относительных движений исполнительных органов установки и заготовки выполняется максимально простым образом. Заготовка

имеет пошаговое круговое вращение с угловым шагом  $\frac{2\pi}{z_i}$ , где  $z_i$  – общее число зубьев  $i$ -го венца блок-вала колес. При этом время  $T_i^k$  обработки  $i$ -го венца блок-вала колес определяется как:

$$T_i^k = z_i^{n^{k_1}} (T_u^{k_1} + T_{nep}^{k_1}) + z_i^{n^{k_2}} (T_u^{k_2} + T_{nep}^{k_2}) + z_i^{n^{k_3}} (T_u^{k_3} + T_{nep}^{k_3}), \quad (4)$$

где в левой части представлено полное время обработки блок-вала колес на операции подготовки боковой поверхности зуба под напыление. В правой части выражения (4) представлено суммарное время обработки отдельными блоками времени профилирования по каждому венцу. Это время состоит из времени собственно профилирования и времени технологического перехода при обработке каждого зуба в

количестве  $z_i^{n^{k_m}}$ , где в свою очередь  $m = (1, 2, 3)$  по количеству слоев профилирования и числа зубьев  $z^k$ , обрабатываемых на каждом зубчатом венце.

Общая конструктивная схема ЭЭО боковой поверхности зубьев венцов блок-вала колес представлена на рис. 4. Зубчатое колесо поз. 1 имеет шаговое периодическое

вращение на угол  $\varphi_i^{z_i^k}$  вокруг оси поз. 2, определяемый числом зубьев  $z^k$  обрабатываемого венца блок-вала и зависи от порядка реализации технологии обработки.

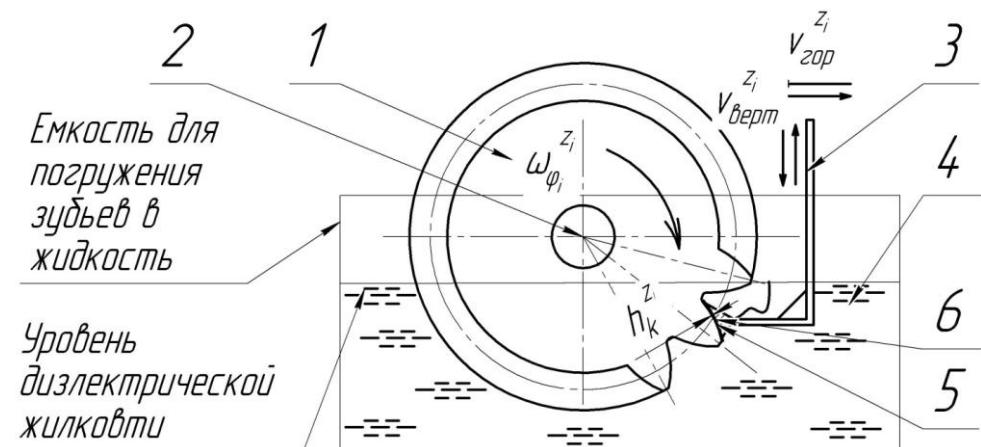


Рисунок 4. Схема ЭЭО боковой поверхности зуба под напыление.

После импульсной обработки 1-го слоя поверхности 5 для  $k$ -го зуба венца кронштейн 3 электрода 6 отводится в горизонтальном направлении от зоны обработки  $V_{гор}^{z_i}$  и подымается вверх  $V_{вверх}^{z_i}$  выше уровня диэлектрической жидкости 4 (масло) для освобождения пространства, которое обеспечивает пошаговый проворот зубчатого венца блок-вала колес на 1 зуб (угол  $\varphi_i^{z_i^k}$ ).

Последовательно обрабатывается  $z^k$  по 1-му слою, после чего осуществляется переналадка. Меняется электрод поз. 6 для профиля 2-го слоя, и осуществляется последовательно обработка всех  $z^k$  зубьев венца, после чего повторяется операция переналадка для 3-го слоя поверхности.

Последовательность выполнения всех действий по профилированию поверхностей зубьев послойно проиллюстрирована на рис. 5 укрупненно.

Выделено три блока выполнения действий, разделенные по каждому венцу и по блокам слоев для каждого венца блок-вала колес. В каждом блоке по каждому венцу действия для обеспечения послойного профилирования боковых поверхностей зубьев повторяются в аналогичной последовательности. При этом угловой шаг поворота колеса индивидуально рассчитывается для каждого венца в зависимости от количества зубьев в угловом секторе переключения каждого венца, и в зависимости от общего числа зубьев на каждом венце блок-вала колес.

Таким образом проводится ЭЭО обработки боковых поверхностей зубьев угловых секторов каждого венца блок-вала колес, профили которых позволяют переходить к операциям с использованием ФОТ-воздействий для нанесения покрытий методом напыления.

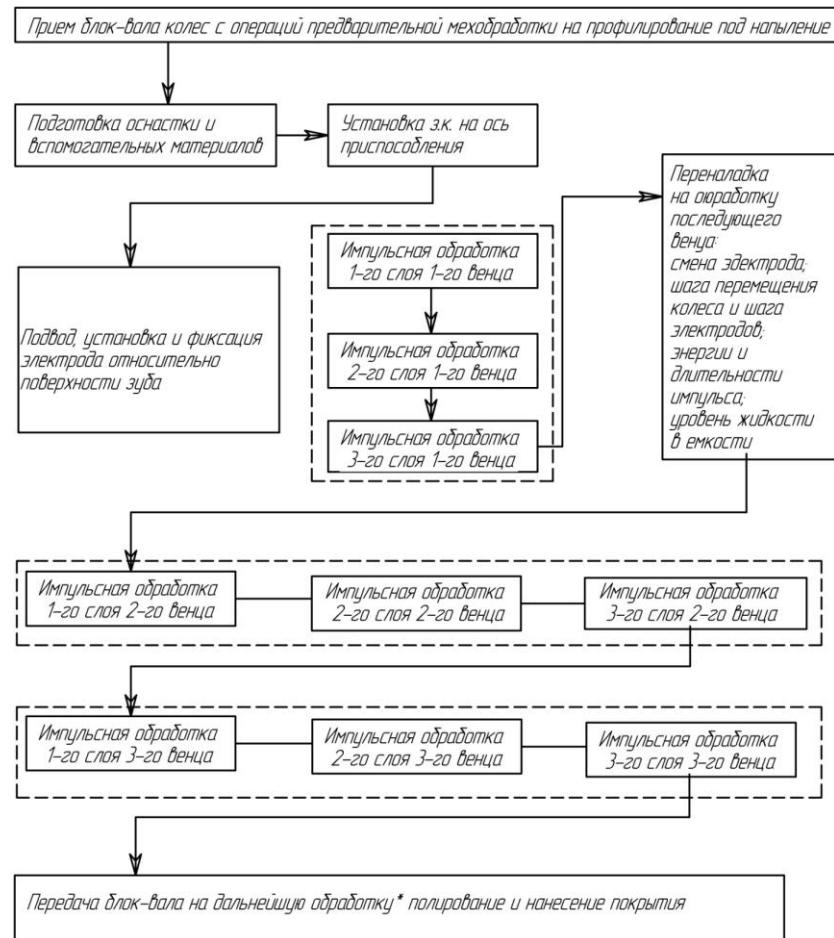


Рисунок 5. Последовательность операций послойного профилирования поверхности зубьев.

По итогам исследований в каждой части работы можно сделать вывод о практической возможности реализации подготовки боковой поверхности зубьев блок-вала колес (с учетом множества различных способов реализации) при применении ФОТ-воздействия на основе методов ЭЭО в заданных координатных локализациях обрабатываемых участков.

#### 4. Заключение

В данной работе приведены результаты исследований относительно образования геометрической формы и поверхностных свойств боковых поверхностей зубьев венцов блок-вала колес, которые расположены в угловых секторах переключения передач. Рассмотрен процесс подготовки боковых поверхностей зубьев за счет дифференциального профилирования под нанесение последующего твердого покрытия методом напыления. Решены следующие частные задачи:

1. Осуществлен выбор способа подготовки боковой поверхности и обеспечения рельефа зубьев методом ООЭ после механической обработки на предварительной операции формообразования и шевингования, предшествующей последующему нанесению твердого покрытия многослойным напылением.

2. Разработан порядок осуществления процесса ФОТ-воздействия на участках с затрудненным доступом серийным инструментов на металлорежущих станках. Разработан алгоритм операции подготовки поверхности под специальное покрытие.

3. Разработана кинематика относительных движений заготовки и исполнительных органов, обеспечивающих геометрию подготавливаемой поверхности.

4. Проработан общий порядок расчета исполнительных инструментов и режимов обработки, обеспечивающей требуемые характеристики поверхности.

Практическое использование результатов исследований, приведенных в настоящей работе, позволяет путем итеративного рекуррентного выбора вариантов ФОТ-воздействий на обрабатываемые поверхности выбрать оптимальный способ обработки деталей с целью улучшения качества и шероховатости обрабатываемых поверхностей в машиностроительном производстве. При этом обработка деталей осуществляется как с применением механической обработки, так и обработки без снятия стружки, что расширяет технологические возможности применения технологий функционально-ориентированных направлений.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Заблонский К. И. Детали машин - К.; Вища школа, 1985. – 518с.
2. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. Донецк, ДонНТУ, 2009. -346с.
3. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
4. Михайлов А. Н. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Вып. 3 (70). С. 22-33. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
5. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения.
6. Нефедьев С. П. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий / С. П. Нефедьев, Р. Р. Дема, Д. А. Котенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 103-106.
7. Михайлов А. Н. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств зубьев КПП при их модификации и формообразовании / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Полякова Л. П. // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-19 сентября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – С. 318-322. ISSN 2079-2670.
8. Михайлов А. Н. К вопросу синтеза структурных схем формирования поверхностных свойств деталей с пленочными образованиями методами ФОТ / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Вып. № 1(72). – С. 27-39. ISSN 2073-3216, (E)ISSN2518-7120
9. Михайлов А. Н. Синтез структурных схем функционально-ориентированного технологического воздействия при формообразовании и формировании поверхностных свойств деталей КПП / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2021. Вып. 2 (73). С. 53-67. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

Поступила в редакцию 20.03.2025 г.

**С. А. Плотников**, д-р техн. наук, проф., **М. В. Смольников**, кан. техн. наук, ст. преп. Вятский государственный университет, Россия  
Tel: +7982-381-35-89; E-mail: mihail.mai@mail.ru

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДВС

*В статье приведены данные по определению показателей процесса сгорания. В настоящее время научное сообщество взяло направление на изучение и внедрение данных без эксперимента. Развитие науки и техники неразрывно связано с использованием симптоматики. В настоящее время для определения эксплуатационных свойств дизельных и искровых двигателей используют моторные установки (стендовые испытания), где при сжигании топлива измеряются выходные параметры.*

*Учёными кафедры «Технология машиностроения» Вятского государственного университета (ВятГУ) задано новое направление по идентификации параметров процесса сгорания в ДВС жидким альтернативным топливом на основе безмоторного экспресс-метода.*

*В результате исследований теоретически обоснованы способы безмоторного определения параметров рабочего процесса автотракторного дизеля при работе на жидким топливом. Уточнены теоретические зависимости определения максимального давления и жесткости процесса сгорания цикла в цилиндре автотракторного дизеля при работе на чистом ДТ. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при работе дизеля на чистом ДТ  $P_z$  равно 10,431 МПа и  $(dp/d\phi)_{max}$  равно 0,619 МПа/градус.*

**Ключевые слова:** альтернативное топливо, процесс сгорания, безмоторные методы, диэлектрическая проницаемость, удельная рефракция

**S. A. Plotnikov, M. V. Smolnikov**

## THE INTRODUCTION OF NON-MOTORIZED EXPRESS METHODS FOR DETERMINING PARAMETERS AND INDICATORS IN THE ENGINE INDUSTRY

*The article provides data on the determination of indicators of the combustion process. Currently, the scientific community has taken the direction of studying and implementing data without experiment. The development of science and technology is inextricably linked with the use of symptoms. Currently, engine installations (bench tests) are used to determine the operational properties of diesel and spark engines, where output parameters are measured during fuel combustion. Scientists of the Department of Mechanical Engineering Technology of Vyatka State University (Vyatka State University) have set a new direction for identifying the parameters of the combustion process in the internal combustion engine of liquid alternative fuels based on the non-motorized express method. As a result of the research, the methods of non-motorized determination of the parameters of the working process of an automotive diesel engine when running on liquid fuels are theoretically justified. The theoretical dependences of determining the maximum pressure and stiffness of the combustion process of the cycle in the cylinder of an automotive diesel engine are clarified.*

**Keywords:** alternative fuels, combustion process, non-motorized methods, dielectric constant, specific refraction.

### 1. Введение

В настоящее время научное сообщество взяло направление на изучение и получение данных без проведения физического эксперимента [1]. Развитие науки и техники неразрывно связано с использованием симптоматики. Порой определить показатели протекания процессов бывает затруднительно в связи с их трудоёмкостью, поэтому некоторые параметры определяются опосредованно. В настоящее время для определения эксплуатационных свойств дизельных и искровых двигателей используют моторные установки (стендовые испытания), где при сжигании топлива измеряются выходные параметры. Данный метод прямых измерений, конечно, трудоёмок, требует сложного лабораторного оборудования, а также не имеет возможности оценить эксплуатацион-

ные свойства по месту эксплуатации. К тому же, на сегодняшнее время накоплен богатый опыт исследований применения безмоторных методов.

Учёными кафедры «Технология машиностроения» Вятского государственного университета (ВятГУ) задано новое направление по идентификации параметров процесса сгорания в ДВС жидких альтернативных топлив (АТ) на основе безмоторного экспресс-метода [2, 3].

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

Среди множества известных альтернативных источников энергии особую роль занимают биотоплива. Они производятся обычно из возобновляемых ресурсов растительного и животного происхождения, в связи с чем вызывают повышенный интерес исследователей. Ввиду того, что физико-химические свойства биотоплив существенно отличаются от свойств традиционного дизельного топлива (ДТ), необходима адаптация конструкции двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Замещение ДТ с меньшими изменениями условий рабочего процесса будет происходить при замене на АТ в жидком виде. Наиболее вероятными, к примеру, в Кировской области, исходя из распространенности, являются такие виды жидких АТ, как спирты и масла [4].

В нашей стране безмоторные методы определения показателей работы двигателя только ещё набирают обороты по изучению. Данными исследованиями занимаются такие организации как: «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»; «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана»; «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»; «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и др. Проводя выборку учёных, занимающихся безмоторными методами оценки показателей работы двигателя, можно сказать, что данный круг очень узок. Вопросы оценки отражены в трудах Камфера Г. М., Николаева В. Ф., Карташевича А. Н., Кartoшкина А. П.

Стоит отметить, что большинство исследований проводились и проводятся только с целью определения возможности работы дизеля на АТ, исследований процесса сгорания, улучшения эффективных показателей дизелей. Также примечательно, что во многих исследованиях смесевые АТ исследованы только лишь энергоёмкими (моторными) методами, которые несколько уходят в прошлое во всех областях науки.

Известно, что удельная и молярная рефракции не зависят от внешних условий - температуры, давления, агрегатного состояния вещества [5]. Однако они находятся в зависимости от состава топлива, наличия органических веществ, содержащих углерод и водород, и числа их атомов в молекуле [6]. Химия определяет, что удельная рефракция - это величина, характеризующая электронную поляризуемость единицы массы вещества в высокочастотном электромагнитном поле световой волны.

Дословно «рефракция» означает преломление, а рефрактометрия — известный метод исследования свойств веществ, основанный на определении показателя преломления и некоторых его функций. Рефрактометрия применяется для идентификации химических соединений, количественного и структурного анализа, определения физико-химических параметров веществ. С помощью метода магнитного двулучепреломления разрабатываются эффективные экспресс-анализаторы нефтепродуктов, позволяющие через корреляционные соотношения прогнозировать целый комплекс эксплуатационных и потребительских свойств.

Огромное число данных по показателям преломления органических жидкостей и неорганических кристаллов (преимущественно минералов), полученных за последнее

столетие, позволяет широко использовать рефрактометрию для установления идентичности исследуемых веществ с ранее описанными зависимостями, а также для оценки степени их чистоты. В настоящее время показатель преломления, наряду с температурами плавления и кипения, принадлежит к числу свойств, определение которых считается обязательным для характеристики жидких соединений, а для минералов измерение показателей преломления иммерсионным методом является важнейшим способом их идентификации [7].

Сама органическая часть жидких топлив состоит из большого количества сложных химических соединений, образованных пятью химическими элементами: углерод (C), водород (H), сера (S), кислород (O) и азот (N). Теплота, выделяющаяся вследствие термохимического окисления топлива, идет на повышение внутренней энергии рабочего тела и на совершение механической работы. А это, в свою очередь, влияет на скорость окисления топлива и характер тепловыделения а, значит, величину максимального давления газов в цилиндре  $P_z$ , что позволяет использовать значения рефракции  $sR$  для предварительной оценки значений максимального давления цикла  $P_z$  при работе дизеля на различных составах АТ.

Анализ полученных данных показал [8], что имеет место корреляционная связь между удельной рефракцией  $sR$  и максимальным давлением в цилиндре  $P_z$ . Можно сказать, что данные теоретических изысканий удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями. На графике (рис. 1) видно, что характер кривых  $P_z$  на всех составах АТ совпадает с характером изменения значений удельной рефракции  $sR$ .

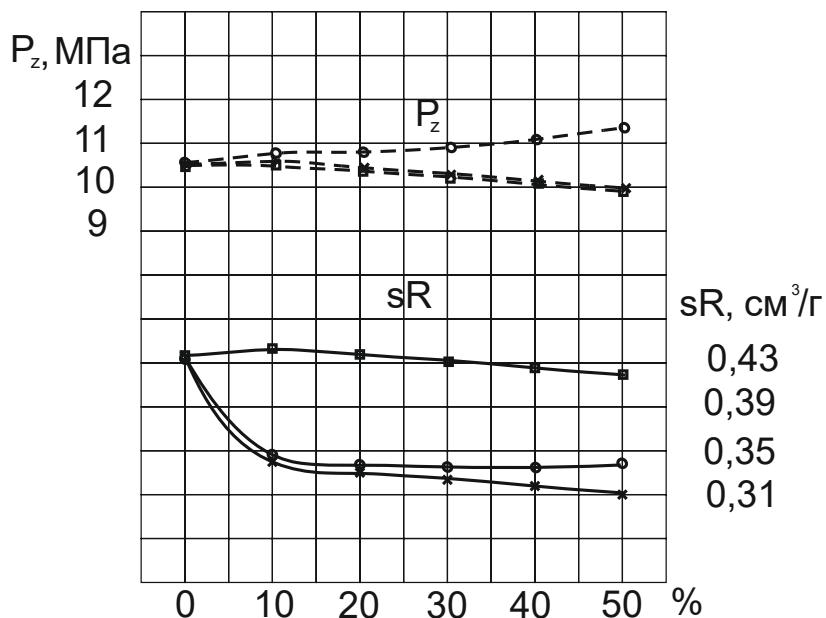


Рисунок 1. Показатели максимального давления цикла, определенные на основе значений удельной рефракции топлив:  $\circ$  —  $sR$  (этанол);  $\times$  —  $sR$  (PM);  $\blacksquare$  —  $sR$  (сурепное масло);  $\circ$  —  $P_z$  (этанол);  $\times$  —  $P_z$  (PM);  $\blacksquare$  —  $P_z$  (сурепное масло).

Известно, что диэлектрическая проницаемость жидких веществ зависит от микроскопической структуры и свойств атомов и молекул вещества. В диэлектрике под воздействием электрического поля происходит поляризация атомов или молекул, что

приводит к образованию внутреннего электрического поля. Макроскопические свойства диэлектриков определяются суммарным эффектом всех микроскопических процессов, происходящих на уровне атомов и молекул. [9]. Концентрация примесей оказывает влияние на диэлектрическую проницаемость состава. Примеси изменяют структуру и свойства смеси, что приводит к изменению его диэлектрических свойств и свойств поляризации. Спирты, например, характеризуются более высокой активностью при горении по сравнению с углеводородами. В диэлектрике, помещённом в электрическое поле, происходит процесс поляризации. Для вещества она определяется молекулярными параметрами: дипольным моментом молекулы, её поляризуемостью и числом молекул в единице объёма.

Максимальная скорость нарастания давления  $(dp/d\phi)_{max}$  зависит от соотношения С/Н в смеси, а, именно, молекулярного состава. Это позволяет использовать для сравнения значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  с жесткостью процесса сгорания  $(dp/d\phi)_{max}$ . Влияние свойств топлива на процесс сгорания в цилиндре дизеля следует рассматривать в связи с зависимостью характеристик топлива. Применение в дизеле топлив облегченного фракционного состава ведет к увеличению ПЗВ и скорости тепловыделения в фазе быстрого сгорания. При этом возрастают максимальное давление цикла и скорость его нарастания [10].

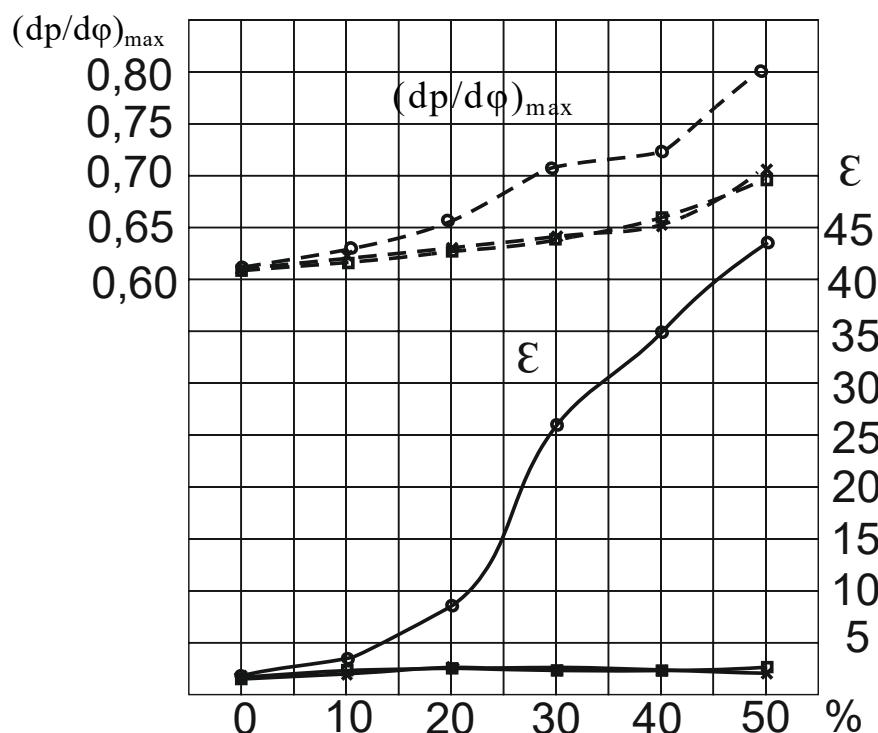


Рисунок 2. Показатели жесткости процесса сгорания, определенные на основе значений диэлектрической проницаемости топлив:  $\circ$  -  $\epsilon$  (этанол);  $\times$  -  $\epsilon$  (PM);  $\blacksquare$  -  $\epsilon$  (сурепное масло);  $\bullet$  -  $(dp/d\phi)_{max}$  (этанол);  $\times - \times$  -  $(dp/d\phi)_{max}$  (PM);  $\blacksquare - \blacksquare$  -  $(dp/d\phi)_{max}$  (сурепное масло).

На графике (рисунок 2) видно, что характер кривых  $(dp/d\phi)_{max}$  на всех составах АТ совпадает с характером изменения значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

### 3. Цифровые модели

Диэлектрическая проницаемость также тесно связана с удельной рефракцией, но, в силу своей физической значимости, определяет не абсолютные, а относительные или временные факторы исследуемых параметров, которые могут быть идентифицированы по наличию экстремумов кривых показатель преломления-состав.

1. Для состава АТ с добавлением сурепного масла формула для расчёта примет следующий вид:

$$P_z = 643545sR^3 + 828146sR^2 - 355164sR + 50773 \quad (1)$$

Коэффициент детерминации между переменными составляет:  $R^2 = 0,9841$ . При увеличении содержания сурепного масла в смеси уменьшаются, как показатель преломления, так и максимальное давление; связь между ними, таким образом, оказывается прямой. Соответственно можно посчитать  $P_z$  через концентрацию добавочного топлива  $C$ , и такая регрессия будет иметь вид:

$$P_z = 10,628 - 0,01425C \quad (2)$$

Коэффициент корреляции между переменными составляет  $R = -0,9914$ ; коэффициент детерминации  $R^2 = 0,983$ .

2. Для состава АТ с добавлением РМ формула для расчёта  $P_z$  получается такой:

$$P_z = -394335sR^3 + 381859sR^2 - 123194sR + 13251 \quad (3)$$

Коэффициент детерминации между переменными составляет  $R^2 = 0,9985$ . Связь между давлением  $P_z$  и концентрацией  $C$  представлена ниже:

$$P_z = 10,613 - 0,01464C \quad (4)$$

Коэффициент корреляции между переменными составляет  $R = -0,9923$ ; коэффициент детерминации  $R^2 = 0,985$ .

3. Для состава АТ с добавлением этанола связь между давлением  $P_z$  прослеживается также через концентрацию спирта в смеси:

$$P_z = -1647560374,14sR^3 + 1644387127,76sR^2 - 547072309,62sR + 60668521,50 \quad (5)$$

Коэффициент детерминации между переменными составляет:  $R^2 = 0,95$ .

Зависимость для определения  $P_z$  при работе на составе АТ с добавлением этанола через удельную рефракцию  $sR$  получается такой:

$$P_z = 1,207 \cdot 10^{-2}sR + 0,0251sR + 10,629 \quad (6)$$

В отношении этанола ситуация оказывается несколько иной. Вероятно, это связано с тем, что показатели преломления у чистого ДТ и чистого этанола практически

совпадают. Судя по приведенным данным выше, зависимость между содержанием этанола и максимальным давлением нелинейная.

Безусловно, показатель - низшая теплота сгорания - является одной из важнейших характеристик топлива: по его величине оценивают энергетические возможности топлива, его влияние на экономическую эффективность. От низшей теплоты сгорания зависит энерговооруженность транспортного средства - запас хода, размеры и масса топливного бака, возможность выполнения транспортной работы на одной заправке. Проводя анализ между всеми ранее рассмотренными показателями можно сказать, что относительная удельная рефракция связана с молекулярной рефракцией, а та, в свою очередь, с низшей теплотой сгорания топлива [11]. От низшей теплоты сгорания  $Q_h$ , соответственно, зависят практически все параметры работы двигателя, такие, как максимальное давление цикла  $P_z$ , скорость нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{max}$  и т.д.

Предложенные математические модели были использованы в дальнейшем при расчетно-теоретическом определении значений максимального давления цикла при работе дизеля на жидким топливах в номинальном режиме.

#### 4. Заключение

В ходе проделанной работы были получены следующие результаты:

1. Теоретически обоснованы способы безмоторного определения параметров рабочего процесса автотракторного дизеля при работе на жидким топливах.

2. Уточнены теоретические зависимости определения максимального давления и жесткости процесса сгорания цикла в цилиндре автотракторного дизеля при работе на чистом ДТ. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при работе дизеля на чистом ДТ  $P_z$  равно 10,431 МПа и  $(dp/d\varphi)_{max}$  равно 0,619 МПа/градус.

3. Предложены теоретические зависимости определения максимального давления цикла в цилиндре автотракторного дизеля при работе добавкой этанола, РМ и сурепного масла. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что для АТ с добавкой 50% этанола  $P_z$  равно 11,233 МПа, для АТ с добавкой 50% РМ  $P_z$  равно 9,912 МПа, для АТ с добавкой 50% сурепного масла  $P_z$  равно 9,945 МПа.

4. Предложены теоретические зависимости определения жесткости процесса сгорания в цилиндре автотракторного дизеля при работе с добавкой этанола, РМ и сурепного масла. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что для АТ с добавкой 50% этанола  $(dp/d\varphi)_{max}$  равно 0,793 МПа/градус, для АТ с добавкой 50% РМ  $(dp/d\varphi)_{max}$  равно 0,667 МПа/градус, для АТ с добавкой 50% сурепного масла  $(dp/d\varphi)_{max}$  равно 0,664 МПа/градус.

5. По данным теоретическим зависимостям получены свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ [12].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Смольников М. В., Плотников С. А., Шишкин Г. П. Детальное изучение опыта применения безмоторного метода в исследованиях учёными Российской Федерации. Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Гусаров (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2024. – Вып. 9. – 309-312 с.

2. Плотников С. А., Шишкин Г. П., Смольников М. В., Гневашев П. В., Кутергин Н. Ю. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств альтернативных топлив с добавкой этанола. Международный научно-технический журнал «Транспорт на альтернативном топливе» № 6 (90)/ 2022г.

3. Плотников С. А., Шишкун Г. П., Гневашев П. В., Резник Е. Н. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств топлив для сельскохозяйственной техники. //Вестник РГАТУ, 2021. - № 2 (13). – С. 110-115.
4. Смольников М. В., Сергеев Д. Г. Потенциал Кировской области в выборе альтернативного топлива. Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. / редкол.: В. Р. Петровец [и др.]. – Горки: БГСХА, 2020. – Вып. 5. – С. 31-35.
5. Верещагин, А. Л. Рефрактометрический анализ. Методические рекомендации к лабораторных работ по курсу «Физическая химия» и «Физическая химия и коллоидная химия» для студентов всех форм обучения всех направлений подготовки и специальностей / А. Л. Верещагин, С. С. Балабанова; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во. Алт. гос. техн. ун-та, 2018. - 31 с.
6. Николаенко А. В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей — М.: Колос, 1984. — 335 с., ил.— (Учебники и учеб. пособия для высш. с.-х. заведений).
7. Иоффе Б. Ф. Рефрактометрические методы химии. 3-е изд., перераб., Л.: Химия, 1983. – 352 с., ил.
8. Плотников С. А., Гневашев П. В., Смольников М. В., Шишкун Г. П. Идентификация максимального давления цикла безмоторным методом на основе удельной рефракции. // Известия МГТУ «МАМИ», Том 17, № 4, 2023. – С. 331-337.
9. Саблина З. А., Широкова Г. Б., Ермакова Т. И. Лабораторные методы оценки свойств моторных и реактивных топлив. – М.: Химия, 1978. – 240., ил.
10. Автомобильные двигатели. Под ред. М. С. Ховаха. М., А22 «Машиностроение», 1977.
11. Плотников С. А., Гневашев П. В., Заболотских Г. Э., Шишкун Г. П., Кантор П. Я., Карташевич А. Н. Расчет жесткости процесса сгорания при работе дизеля. //Свидетельство об офиц. регистр. прогр. для ЭВМ №2024613184 от 08.02.2024.
12. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов втузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» В. П. Алексеев, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин и др.; Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 288 с., ил.

Поступила в редколлегию 21.03.2025 г.

**А. О. Харченко**, канд. техн. наук, проф., **С. В. Корчевский**, аспирант,  
**А. А. Харченко**, канд. техн. наук, доц.

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

Тел./Факс: +7 (8692) 550077; E-mail: [AOKharchenko@sevsu.ru](mailto:AOKharchenko@sevsu.ru)

## ПРОГРЕССИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЗАТЫЛОВАНИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ МЕТЧИКОВ

*В статье производится анализ современного станочного оборудования для затылования зубьев мелкоразмерного осевого инструмента, в том числе метчиков. При этом в качестве затыловочных движений используют возвратно-поступательное радиальное перемещение резца или шлифовального круга. Исследования показали, что в результате превышения допустимых величин затылования происходит срезание вершин, ведущее к уменьшению наружного диаметра, а при затыловании по всему профилю будет происходить его искажение. Новая технология предполагает использование осевого возвратно-поступательного перемещения затыльующего инструмента, а также сочетание его с дополнительным радиальным перемещением, реализуемым на усовершенствованном станочном оборудовании, что позволяет существенно повысить качество и эффективность затыльуемого инструмента.*

**Ключевые слова:** затыловочный станок, радиальное затылование, движения осевого затылования, мелкоразмерный метчик.

**A. O. Kharchenko, S. V. Korchevski, A. A. Kharchenko**

### ADVANCED EQUIPMENT FOR BACKING SMALL-SIZED TAPS

*The article analyzes modern machine tools for grinding teeth of small-sized axial tools, including taps. In this case, the reciprocating radial movement of the cutter or grinding wheel is used as the occipital movements. Studies have shown that as a result of exceeding the permissible values of the occlusion, the vertices are cut off, leading to a decrease in the outer diameter, and when occluding, its distortion will occur throughout the profile. The new technology involves the use of axial reciprocating movement of the backing tool, as well as its combination with additional radial movement implemented on advanced machine tools, which significantly improves the quality and efficiency of the tool being backed.*

**Keywords:** occlusion machine, radial occlusion, axial occlusion movements, small-size tap.

### 1. Введение

В настоящее время в машино- и приборостроении наиболее прогрессивным методом обработки внутренних резьб в деталях из различных материалов является применение режущих, а также пластически деформирующих метчиков, для которых крайне важной операцией является процесс затылования рабочих поверхностей зубьев рабочей части, обеспечиваемый затыловочными или резьбошлифовальными станками [1, 2, 3].

Традиционным образом сложилась тенденция использования специализированных токарно-затыловочных станков, производящих обработку задних и рабочих поверхностей зубьев инструментов, как простейшими резцами, так и фасонными. Основным движением при затыловании в таких станках является возвратно-поступательное поперечное перемещение резца, обеспечиваемое особенностью конструкции суппорта. Как правило, это наличие так называемой цепи затылования, связывающей вращение шпинделя с вращением кулачка затылования [2].

Анализ исследований показывает, что при обработке внутренних мелкоразмерных резьб применяются метчики с различной конфигурацией затылованных зубьев в поперечном сечении [4, 5, 6]. При этом традиционное

затылование осуществляется за счет радиального перемещения инструмента (резьбошлифовального круга) в процессе обработки зубьев рабочей части метчиков и зачастую не обеспечивает требуемые показатели точности и качества затылованных поверхностей, в особенности, мелкоразмерных метчиков [7].

Целью данной работы является обзор существующих моделей затыловочного оборудования и на основе анализа подходов к выполнению процесса затылования поиск путей совершенствования затылования рабочей части мелкоразмерных метчиков.

В связи с этим является целесообразным рассмотрение существующих методов затылования метчиков, технологического оборудования – его конструкций и возможностей, выработка рекомендаций по усовершенствованию последних с учетом исследовательского опыта в данной области.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Различают в зависимости от направления движения заты�ующего инструмента радиальное затылование (метчики, дисковые и червячные модульные фрезы), косое (фасонные фрезы), торцовое (осевое), когда затыливающее движение совершается параллельно оси центров станка.

Метчики, широко использующиеся в машиностроении для образования резьбы в отверстиях, разнообразны по конструкциям и геометрическим параметрам [3-7].

Различные виды существующих поперечных сечений метчиков получены радиальными движениями для придания необходимой конфигурации зубьям и реализуются на специализированном затыловочном оборудовании (рисунок 1, *a-г*) [2] или резьбошлифовальных станках (рисунок 2, *a-е*) [1, 4].

В отечественной среде производства специализированных токарно-затыловочных станков ведущее место занимает Средневолжский станкостроительный завод (СВСЗ). Первым разработанным им токарно-затыловочным станком была модель К96, предназначавшаяся для затылования зубьев червячных модульных фрез, модульных дисковых и фасонных фрез, а также затылования метчиков. Кроме указанных операций на станке имелась возможность осуществлять все токарные работы: точение наружной и внутренней поверхностей, нарезание резьб и т.д. Со временем данный станок был заменен серией более совершенных моделей – 1818, затем 1Б18 и, наконец, наиболее современными представителями 1Е811 и 1Е812 (рисунок 1, *а, б*). Имеющийся дополнительный привод позволяет производить затылование не только резцом, но и шлифовальным кругом.

Начиная с 90-х годов прошлого века, оборудование Средневолжского станкостроительного завода выпускается под торговой маркой SAMAT. Станки с цифровой индикацией 1Е811С1 и 1Е812С1 выпускаются также под наименованием SAMAT 25К (1Е812С1).

В сегменте современного зарубежного затыловочного оборудования значатся станки из Германии модели DH-250/4 (рисунок 1, *в*) и высокоточные станки с ЧПУ, поставляемые из стран-производителей Азии в Российскую компанию «Точные машины». Станок DH-250/4 представляет собой оборудование для выполнения, в том числе, затыловочной обработки шлифовальным кругом посредством отдельного привода.

Наиболее технологически эффективным и высокопроизводительным можно считать станок с ЧПУ модели ТМ НТМ-L (рисунок 1, *г*), который применяется для скоростной прецизионной обработки зубьев зубонакатных инструментов, а также фрез для нарезания шлицев. На станке используется система сервоуправления *G-SPEED NC*

*U3E*, обладающая высокой точностью, быстрой скоростью расчетов и повышенной устойчивостью к помехам. Система ЧПУ имеет простой в управлении интерфейс. Имеется также поворотная головка (ось *C*) – сверхжесткий узел с полузамкнутым контуром управления и регулируемым зазором. Ось *X* (подача и затылование) оснащена линейным двигателем *Sodick* с большой тягой, градуированной линейкой *Fagor*, и имеет конструкцию с полностью замкнутым контуром. В механизме подачи применяются высококачественные роликовые направляющие и ШВП.

Система ЧПУ обеспечивает взаимосвязанное движение по трем осям (*C*, *X*, *Z*), что позволяет производить обработку зубьев различной формы. Это является существенным преимуществом по сравнению с ранее рассмотренными моделями токарно-затыловочных станков.

Окончательное затылование по наружному, среднему и внутреннему диаметрам пластически деформирующих метчиков осуществляется, как правило, на резьбошлифовальных станках путем соответствующей настройки гитары затылования и механизма затылования [2]. Расчетные перемещения при настройке гитары затылования для всех моделей станков одинаковы и определяются числом граней *N* метчика:

$$1 \text{ оборот заготовки} \rightarrow n \text{ оборотов кулачка.}$$

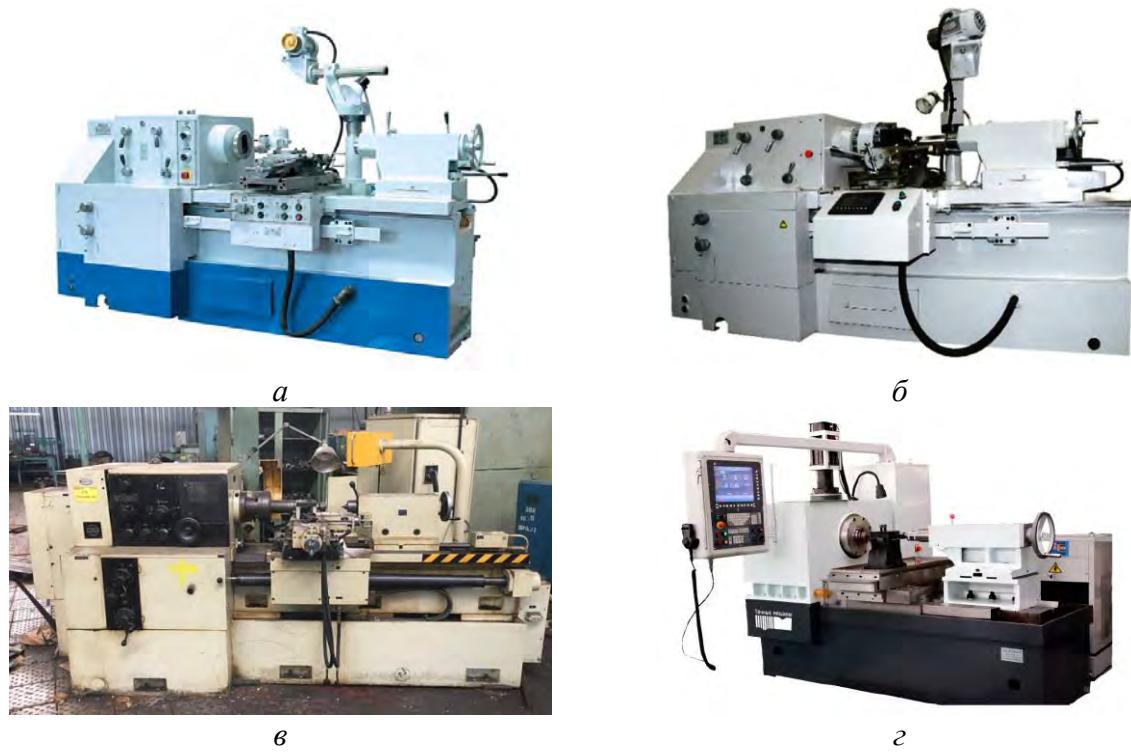


Рисунок 1. Токарно-затыловочные станки: *а* – 1E811; *б* – 1E812; *в* – DH-250/4; *г* – станок с ЧПУ ТМ HTM-L

Однако движение затылования в различных станках неодинаково. В конструкциях станков фирмы Линднер и Эксцелло резьбы метчиков затылывают при покачивании стола 1 на опорной оси 4 от врачающегося кулачка затылования 5, вследствие чего заготовка 2 метчика получает добавочное перемещение (рисунок 2, *а*). При этом шлифовальная бабка 3 остается неподвижной. У станков 5Б82 и 5810 кулачком 4 (рисунок 2, *б*) создается покачивание корпуса шлифовальной бабки 3, а

дополнительный съем металла с заготовки 1 обеспечивается покачиванием круга 2 совместно со шлифовальной бабкой 3 вокруг неподвижной оси 5.

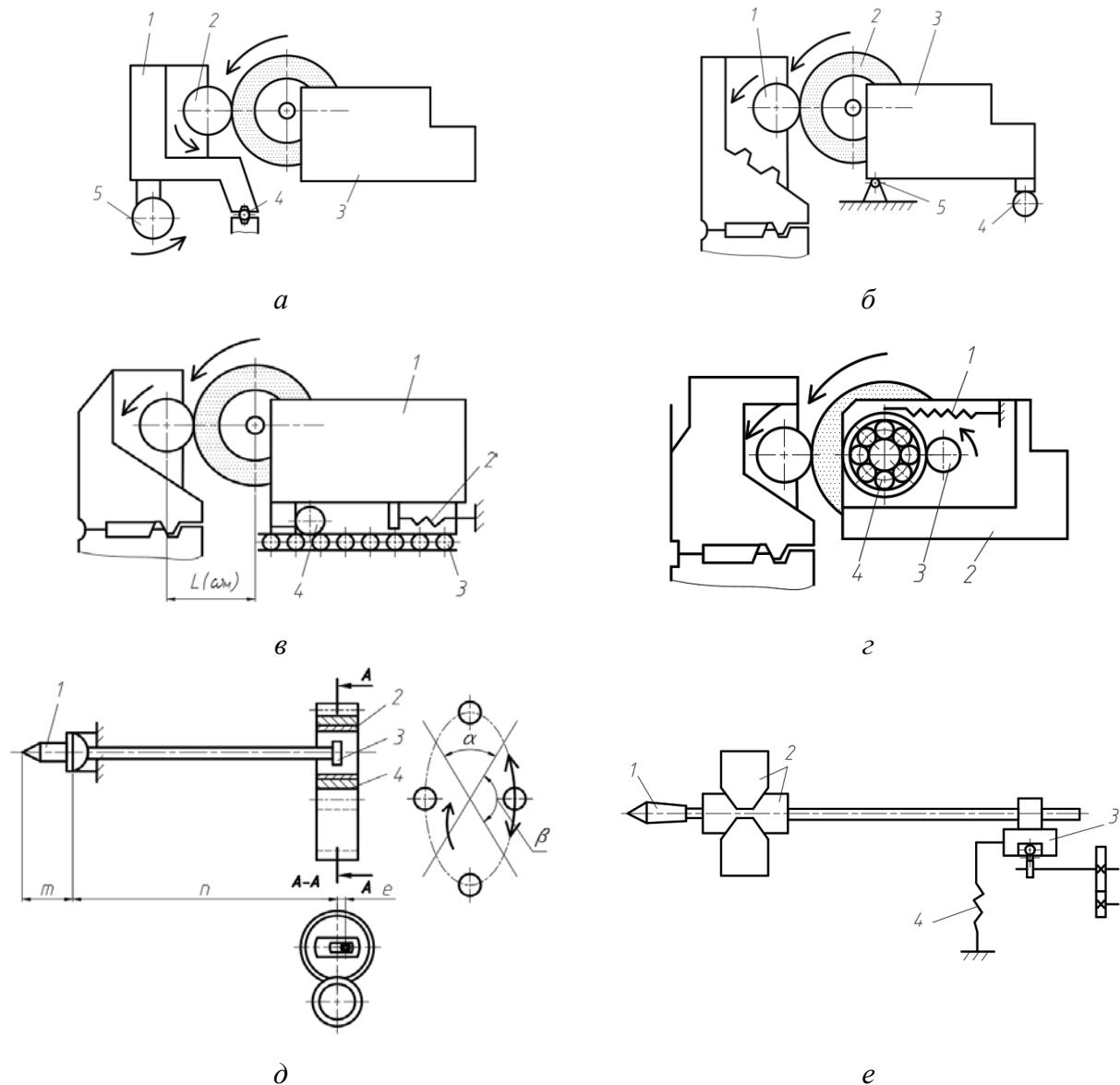


Рисунок 2. Схемы формообразующих движений в конструкциях резьбошлифовальных станков

На резьбошлифовальных станках 5820, 5821, 5822 затылование резьбы происходит при возвратно-поступательном перемещении шлифовальной бабки 1 (рисунок 2, *в*) по направляющим качения 3 от кулачка затылования 4 (возвратное движение – от усилия пружины 2, закрепленной одним концом на шлифовальной бабке, а другим – на станине станка). На некоторых станках фирмы Эксцелло качающейся частью является только гильза шлифовального шпинделя вместе с кругом (рисунок 2, *г*). Гильза 4 шлифовального шпинделя совершает качательные перемещения от кулачка 3, к которому она прижимается пружиной 1, а шлифовальная бабка 2 находится в неподвижном состоянии. Станки фирмы Вебер затылование осуществляют путем покачивания опорного центра задней бабки (рисунок 2, *д*).

Шпиндель 1 задней бабки имеет сферическую опору, позволяющую ему покачиваться, а ползунок 2 перемещается в зубчатом колесе 4 по специальным направляющим вместе со сферической шайбой 3. Сферическая шайба, смещаясь по кривой при некотором эксцентризите  $e$ , задаваемом с учетом определенного соотношения плеч  $m$  и  $n$ , обеспечивает перемещение опорного центра совместно с заготовкой. В станке MB13 колебательное перемещение сообщается опорному центру 1 задней бабки (рисунок 2,  $e$ ), размещенному на призматических опорах 2, при этом сухарь 3 прижимается к кулачку пружиной 4.

При затыловании (рисунок 2, б) шлифовальный круг, покачиваясь вокруг опорной оси 5, имеет точки контакта с заготовкой, расположенные выше и ниже её оси. При затыловании по схеме (рисунок 2, в) за счет возвратно-поступательного перемещения шлифовальной бабки шлифовальный круг перемещается строго в осевой плоскости детали. Следовательно, из-за различий в схемах движений при затыловании геометрия поперечного сечения метчиков, несмотря на одинаковую величину затылования, обеспечиваемую одним и тем же кулаком при постоянном радиусе шлифовального круга, будет неидентичной. В подобных случаях фактическая геометрия поперечного сечения метчиков, обработанных на станках с различными конструктивными схемами затылования, может быть описана соответствующими уравнениями, выведенными на основе рассмотрения кинематического взаимодействия заготовки метчика и шлифовального круга в процессе затылования рабочей части инструмента [7].

В работах [1, 6, 7] показано, как реальная резьбовая поверхность метчика отличается от номинальной и обусловлена существующей технологией её изготовления (рисунок 3).

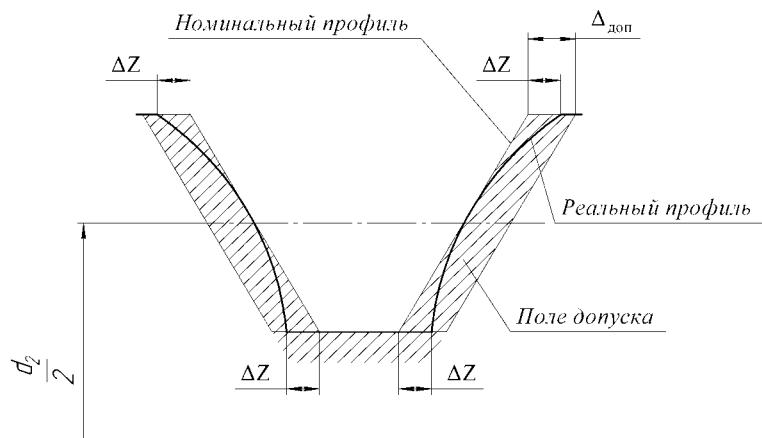


Рисунок 3. Схема формирования реального профиля резьбы метчика

При изготовлении зубьев режущих метчиков с затылованием по профилю и зубьев деформирующих метчиков имеет место постоянное изменение протяженности зоны контакта метчика с кругом. В этом случае погрешности профиля зубьев существенно увеличиваются. Для оценки величины погрешностей описывают процесс получения линий – образующих профиля резьбы [7].

В процессе затылования по наружному диаметру шлифовальным кругом в результате превышения допустимых величин затылования происходит срезание вершин, ведущее к уменьшению наружного диаметра, а при затыловании по всему профилю будет происходить его искажение.

Подрезание профиля происходит также из-за того, что шлифовальный круг наклоняется по отношению к оси метчика на угол подъема резьбы, подсчитываемый по среднему диаметру. То есть наклон круга соответствует подъему винтовой линии только на среднем диаметре, а в остальных точках, не лежащих на среднем диаметре, наклон отличается от угла подъема резьбы. По отношению к номинальному диаметру резьбы метчика  $d_0$  допустимое затылование для трехгранных метчиков составляет  $K_{don} = 0,07d_0$ , для четырехгранных  $K_{don} = 0,04d_0$ , для пятигранных  $K_{don} = 0,03d_0$  и для шестигранных  $K_{don} = 0,02d_0$  [1].

В Севастопольском государственном университете (СевГУ) разработан ряд способов и устройств для затылования зубьев инструмента с большими величинами затылования и с высокой точностью резьбового профиля на рабочих выступах метчиков [7, 8, 9].

Один из предложенных способов [8] существенно расширяет технологические возможности затылования за счет того, что выполняется путем сообщения обрабатывающему инструменту дополнительных возвратно-поступательных движений в направлении, совпадающем с продольным перемещением, причем параметры этих движений задают, исходя из требуемой формы зуба. При этом имеется возможность придания обрабатывающему инструменту также дополнительного возвратно-поступательного движения в радиальном направлении.

Для осуществления способа используется станок, на затыловочном суппорте которого установлен с возможностью возвратно-поступательного перемещения в продольном направлении дополнительный суппорт, кинематически связанный с валом привода затылования. Такое решение позволяет получать различные формы зубьев режущих инструментов.

На рисунке 4 показан план скоростей при затыловании зубьев режущих инструментов, на рисунке 5 – некоторые примеры форм зубьев, затылованных по предлагаемому способу; на рисунке 6 – план скоростей при затыловании зубьев режущих инструментов, когда обрабатывающему инструменту сообщают дополнительное возвратно-поступательное движение в радиальном направлении (a) и пример выполнения зуба при осуществлении затылования по указанной совокупности движений (б); на рисунке 7 – кинематическая структура станка для реализации способа; на рисунке 8 – пример выполнения предлагаемого станка.

Способ затылования зубьев метчика осуществляется следующим образом. Заготовке метчика сообщают вращение  $V_{okp}$  (рисунок 4), а обрабатывающему инструменту (резьбошлифовальный круг) согласованное с этим вращением продольное перемещение  $V_{prod}$ . Результирующее движение  $V_p$  осуществляется под углом  $\alpha$  (угол подъема резьбы метчика) к  $V_{okp}$ . Одновременно с этим обрабатывающему инструменту дополнительно сообщают возвратно-поступательные движения  $V_{dob}$ , совпадающие с продольным перемещением  $V_{prod}$ . Суммарный вектор  $V_{\Sigma}^I$  (рисунок 6, а) определяет направление движения затылования боковой поверхности зуба метчика  $ab$  (рисунок 4) на величину бокового затылования  $K^I$ . При этом часть боковой поверхности зуба  $ab$  может быть выполнена незатылованной (участок  $f$ ).

В качестве одного из вариантов выполнения способа обрабатывающему инструменту одновременно с вышеперечисленными перемещениями сообщают дополнительное возвратно-поступательное движение  $V_{rad}$  (рисунок 6, а) в радиальном направлении, тогда движение затылования происходит в направлении вектора  $V_{\Sigma}^{II}$ .

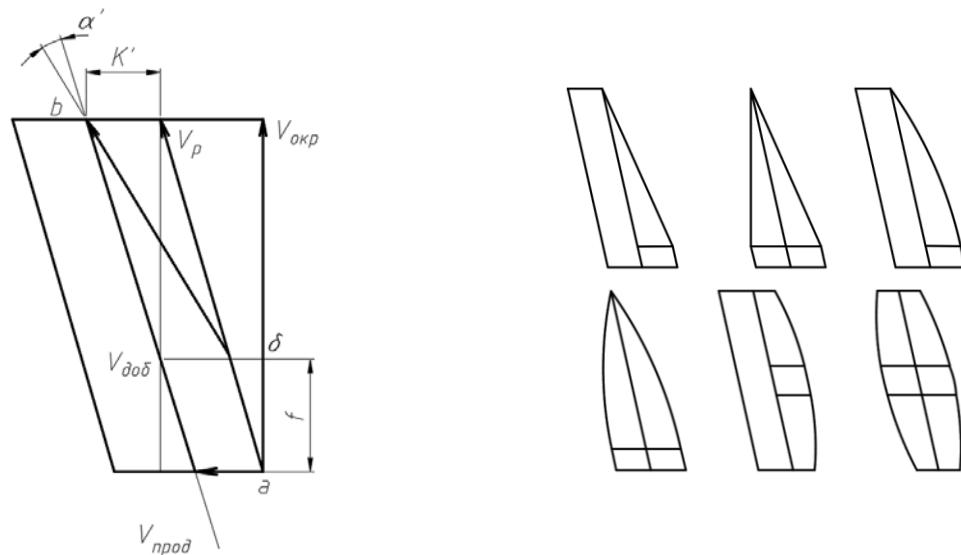


Рисунок 4. План скоростей при затыловании зубьев метчиков осевым методом

Рисунок 5. Формы зубьев, достигаемые при помощи затылования осевым методом

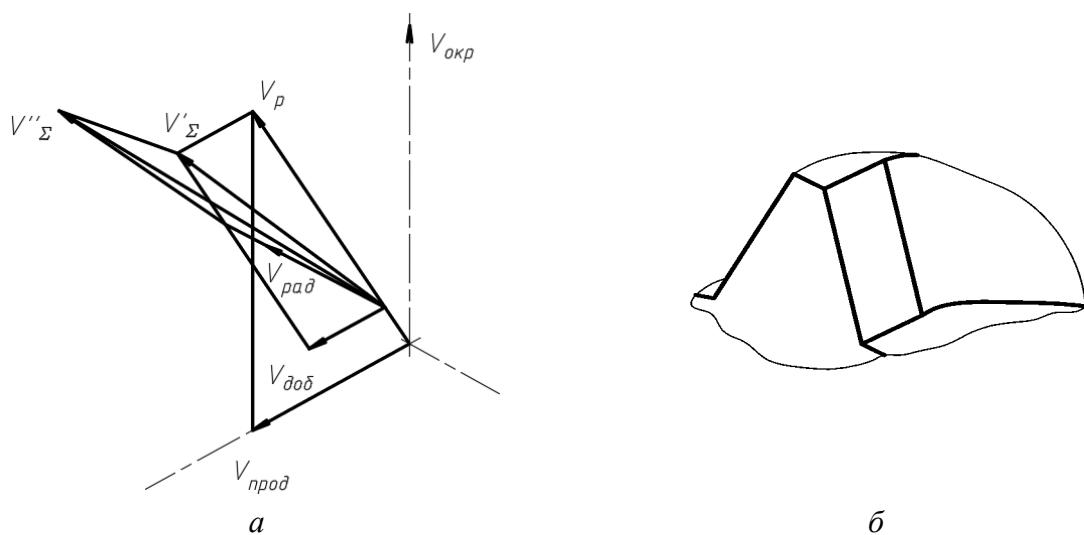


Рисунок 6. План скоростей при затыловании зубьев метчиков осевым методом с дополнительным радиальным врезанием (a) и пример выполнения зуба (б) при осуществлении затылования по указанной совокупности движений

Структура станка содержит следующие кинематические цепи: 1. Цепь главного движения (вращение заготовки инструмента). 2. Цепь продольного перемещения суппорта (резьбонарезная цепь). 3. Цепь возвратно-поступательного движения в радиальном направлении (цепь затылования в радиальном направлении). 4. Цепь возвратно-поступательного перемещения в продольном направлении (цепь затылования в продольном направлении). 5. Цепь дифференциала (дополнительное движение инструмента инструментов, таких, как червячные модульные фрезы, метчики с винтовыми стружечными канавками и т.п.). 6. Цепь подач.

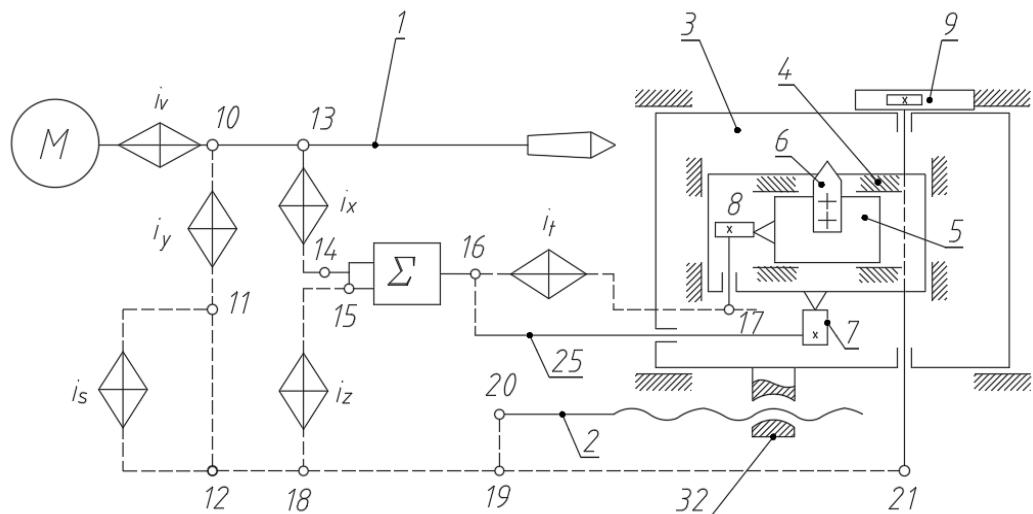


Рисунок 7. Кинематическая структура станка для реализации способа

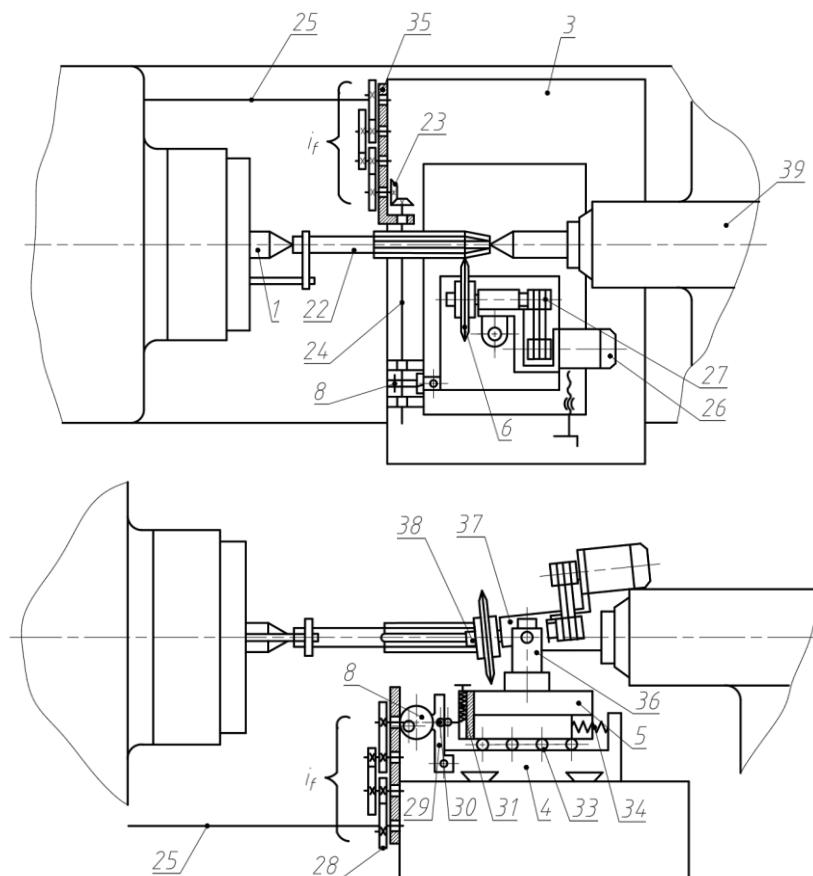


Рисунок 8. Пример выполнения станка для реализации способа затылования

Затылование зубьев режущего инструмента, например, метчика (М6х1), осуществляют на станке следующим образом.

Метчику 22 сообщают вращательное движение, а шлифовальному кругу 6 вращательное движение, движение продольной подачи и возвратно-поступательное движение, совпадающие с продольным перемещением.

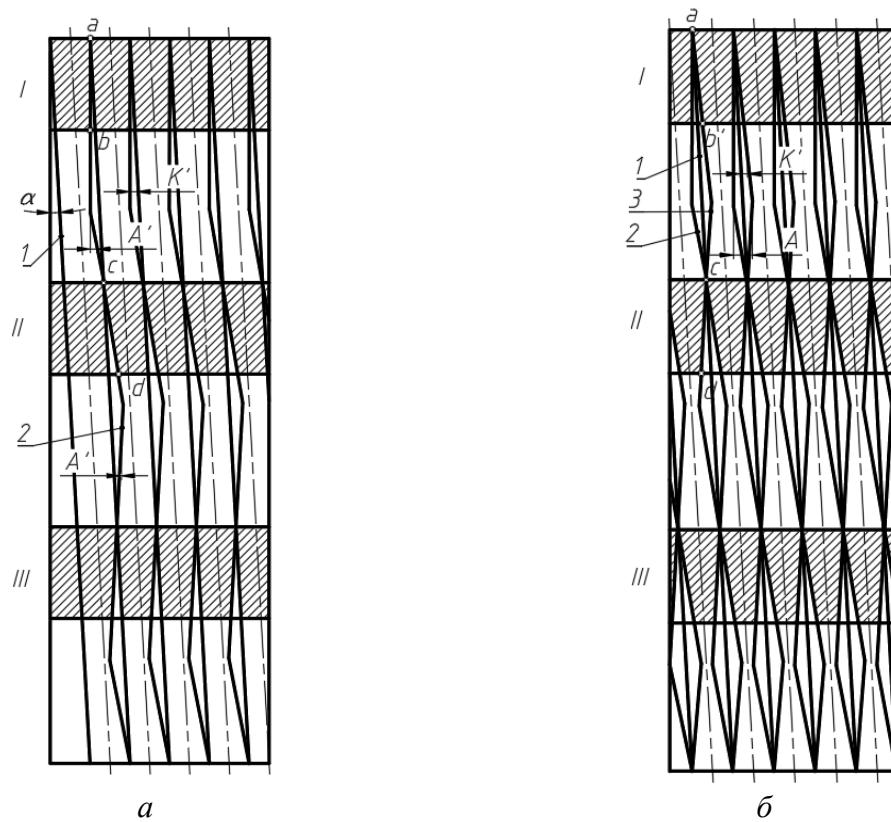


Рисунок 9. Развёрнутые на плоскость рабочие поверхности затылувемого метчика в последовательности их затылования

Вращение метчика и движение продольной подачи образуют траекторию винтовой линии, а профиль инструмента 6 копируется (переносится) на метчик.

В это же время от кулачка 8 дополнительному суппорту 5 с инструментом 6 сообщают возвратно-поступательное движение в направлении, совпадающем с продольным перемещением. При повороте метчика на следующее перо дополнительный суппорт 5 возвращают в исходное положение и при дальнейшем повороте метчика цикл движений дополнительного суппорта 5 повторяется.

В начальный период затылования на пере I обрабатывающий инструмент, двигаясь по траектории 2, затылывает правую боковую грань зуба (ab) на величину  $K'$ , а на пере II – левую грань (cd) на величину  $K''$  и т.д. (рисунок 9, а, винтовая линия 1 резьбы метчика). Для затылования зубьев, с другой стороны, обрабатывающий инструмент 6 из точки с (пересечение траектории затылования с траекторией резьбы) переводят в аналогичную точку на предыдущем пере (точка a). Затем производят затылование по траектории 3 (рисунок 9, б) и обрабатывают оставшиеся грани зубьев ab', cd' и т.д. На этом операцию затылования заканчивают.

Используя предлагаемый способ затылования и станок для его осуществления, можно получать также различные формы зубьев инструментов, работающих методом пластической деформации, в частности, пластически деформирующих метчиков [7, 9-12].

### 3. Заключение

Таким образом, анализ существующего затыловочного оборудования с учетом особенностей процесса затылования зубьев мелкоразмерных метчиков подтверждает

необходимость совершенствования технологии их обработки с целью повышения точности и качества затыльуемых поверхностей. Новая технология предполагает использование осевого возвратно-поступательного перемещения затыльующего инструмента, а также сочетание его с дополнительным радиальным перемещением, реализуемым на усовершенствованном станочном оборудовании. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса мелкоразмерной резьбообработки [10-12] подтверждают преимущество метчиков, затылованных способом осевой подачи как по точности обработки резьбового отверстия, так и по стойкости и экономической эффективности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Меньшаков В. М. Бесстружечные метчики / В. М. Меньшаков, Г. П. Урлапов, В. С. Середа. – М.: Машиностроение, 1976. – 167 с.
2. Рабкин А. Л. Затыловочные станки / А. Л. Рабкин. – М.: Машиностроение, 1976. – 128 с.
3. Якухин В. Б. Оптимальная технология изготовления резьб / В. Б. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
4. Мирнов И. Я. Затылование режущей части метчиков для нарезания точных резьб / И. Я. Мирнов, О. А. Анпилогов // СТИН – 1984. – №4. – С.18 – 19.
5. Матвеев В. В. Нарезание точных резьб / В. В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.
6. Рыжов Э. В. Раскатывание резьб / Э. В. Рыжов, О. С. Андрейчиков, А. Е. Стешков. – М.: Машиностроение, 1974. – 122 с.
7. Братан С. М. Повышение точности формообразования мелкоразмерных резьб метчиками в алюминиевых сплавах / С. М. Братан, Ф. Н. Канаареев, П. А. Новиков, А. О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
8. Харченко А. О. Анализ схем и методов затылования зубьев рабочей части мелкоразмерных метчиков / А. О. Харченко, С. В. Корчевский // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевГУ, 2023. – Вып.1(29). – С.21-30.
9. А.с. № 841778 SU, МПК B23B 1/00, B23B 5/42. Способ затылования зубьев режущих инструментов и станок для его осуществления / Канаареев Ф. Н., Харченко А. О., Сицкий Г. Н.; заявитель и правообладатель Севастопольский приборостр. ин-т.; опубл. 30.06.1981.
10. Харченко А. О. Стендовое оборудование для исследования надежности затылованных мелкоразмерных метчиков / А. О. Харченко, С. В. Корчевский, А. А. Харченко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева», 2024. № 5(367). – С. 181-192.
11. Харченко А. О. Экспериментальное оборудование для исследования мелкоразмерных метчиков / А. О. Харченко, А. А. Харченко, С. В. Корчевский // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевГУ, 2024. – Вып.4(36). – С.9-15.
12. Харченко А. О. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении / А. О. Харченко, С. М. Братан, А. А. Харченко, Е. А. Владецкая. – М.: Центркatalog, 2022. – 288 с.

Поступила в редакцию 21.03.2025 г.

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

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Тел./Факс: + 375 172939581; E-mail: chygryanova@yandex.by

## ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*В статье приведены данные по использование современного информационно-аналитического обеспечения приемов управления многофакторной системой «металл – управляющее воздействие – среда – покрытие» при микродуговой обработке (МДО) для установления взаимосвязей между технологическими режимами МДО, структурой и свойствами покрытия, условиями эксплуатации и поведением обработанного объекта в этих условиях, а также для гарантированного соответствия полученного продукта принятым критериям качества и надежности в работе.*

**Ключевые слова:** информационно-аналитическое обеспечение, управление, микродуговое оксидирование покрытие, электрические параметры, качество, специализированные устройства, программное обеспечение.

N. M. Chigrinova

### INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT OF QUALITY MANAGEMENT PROCESSES AND SURFACE ENGINEERING OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTS WHEN FORMING COATINGS

*The article provides data on the use of modern information and analytical support for control techniques of a multifactor system “metal – control action – environment – coating” during micro-arc machining (MAM) to establish relationships between the technological modes of MAO, the material being processed, its structure and properties, operating conditions and the behavior of the processed object under these conditions, as well as to ensure that the resulting product meets the quality and operational reliability criteria accepted for each specific case.*

**Keywords:** information and analytical support, control, micro-arc oxidation coating, electrical parameters, quality, specialized devices, software.

#### 1. Введение

Государственной программой развития машиностроительного комплекса Республики Беларусь на 2021 – 2025 годы предусматривается инновационное развитие данной отрасли, ускоренный переход к использованию новых высокопроизводительных и ресурсосберегающих технологий на основе применения современного информационно-аналитического обеспечения. В результате реализации Госпрограммы базовые показатели социально-экономического развития машиностроения должны существенно улучшиться в первую очередь за счет комплекса мер по их технической и технологической модернизации.

Перспективными путями повышения конкурентоспособности идущей на экспорт и необходимой для развития экономики республики продукции машиностроения является создание и развитие энергоемких и эффективных технологий, способных обеспечивать преимущества производимых изделий за счет использования инноваций в процессе их создания, связанных с формированием в критических зонах функционально адаптированных покрытий. Наличие таких малозатратных ресурсо- и энергосберегающих инновационных технологий позволит осуществлять ремонт, техническое обслуживание и модификацию различных агрегатов машиностроения

без привлечения иностранных центров технического обслуживания и ремонта. Кроме того, появится возможность освоить новые виды деятельности, обеспечить широкий спектр услуг для иностранных поставщиков и в перспективе завоевать новые рынки заказов на десятилетия вперед.

Перспективным направлением создания защитных покрытий с требуемым набором функциональных свойств на изделиях машиностроения широкой номенклатуры является метод микродугового оксидирования (МДО) [1]. Данный процесс отличается низкотемпературной обработкой вентильных металлов (Al, Ti, Zr, Nb, Ta, Mg) и их сплавов с созданием оксио-керамических покрытий. Вместе с тем широкое промышленное использование МДО сдерживается его относительно невысокой производительностью, стохастическим характером формирования покрытий, что не позволяет гарантировать получение равнотолщинных слоев с регулярной структурой и однородными свойствами обработанной поверхности [2–4].

Современный уровень проведения исследований и экспериментов с целью разработки работоспособной и производительной технологии формирования покрытий с прогнозируемыми параметрами требует точного и выверенного подхода к выработке приемов управления динамикой и кинетикой процессов их создания и роста.

Поэтому целью настоящего исследования является использование современного информационно-аналитического обеспечения приемов управления многофакторной системой «металл – управляющее воздействие – среда – покрытие» при микродуговой обработке (МДО) для установления взаимосвязей между технологическими режимами МДО, обрабатываемым материалом, его структурой и свойствами, условиями эксплуатации и поведением обработанного объекта в этих условиях, а также для гарантированного соответствия полученного продукта принятым для каждого конкретного случая критериям качества и надежности в работе [5].

В данном исследовании указанную проблему решали посредством разработки и подключения к специализированному оборудованию МДО двух специализированных устройств для более точной реализации требуемых параметров создаваемых покрытий и повышения производительности процесса МДО в целом.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Для изучения особенностей микродуговых процессов при изменяющихся условиях и параметрах оксидирования был создан автоматизированный информационно-измерительный комплекс (ИИК) [6], предназначенный для высокоточного измерения и регистрации в режиме реального времени с одновременным выводом полученных графиков на дисплей электрических характеристик МДО, разработаны программное обеспечение и методика измерения и регистрации в режиме *online* постоянных напряжения и тока с возможностью усреднения полученных данных, импульсных напряжения и тока с определением числа импульсов, их высоты, длительности и средних значений, амплитуды импульсов за время протекания исследуемого процесса, среднеинтегральных значений тока и напряжения с последующей коррекцией *online* электрических параметров в управляющем процессом МДО блоке специализированного оборудования [7].

Концепция ИИК с использованием информационных технологий базируется на том, что обработка поверхности осуществляется с помощью микродуговых разрядов, формирующих импульсный электрический ток.

ИИК (рис.1) создан на базе персональной ЭВМ типа IBM PC с применением внешнего восьмиканального АЦП ADCS 5K/12-8 и согласованного с ним усилителя

AMP-8. С помощью разработанного программного обеспечения учитывали конкретные условия работы АЦП ADCS 5K/12-8. Контроль вольт-амперных режимов посредством ИИК-1 позволяет усовершенствовать работу стандартного оборудования, обеспечивая получение высокоплотных и точных покрытий в энергосберегающем режиме. Кроме того, прирост толщины покрытия существенно ускоряется, делая МДО более производительной.

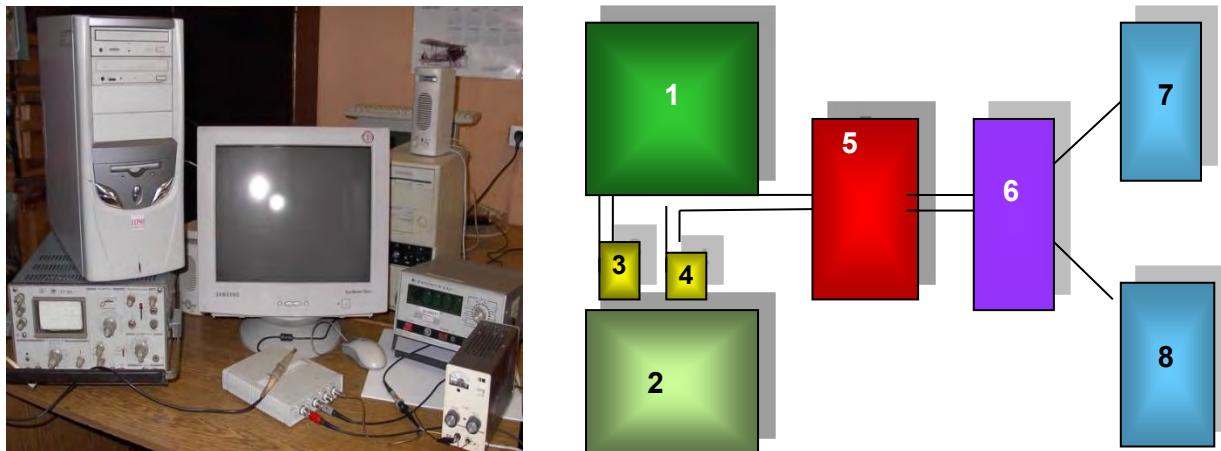


Рисунок 1. Внешний вид и блок-схема ИИК:  
 1 – серийный прибор (стойка МДО-2); 2 – ванна с электролитом;  
 3 – делитель напряжения; 4 – датчик тока;  
 5 – АЦП (плюс усилитель при необходимости);  
 6 – системный блок компьютера;  
 7 – устройство визуального отображения информации (монитор);  
 8 – устройство отображения информации на бумажный носитель (принтер).

Таблица 1. Назначение и маркировка комплектующих ИИК-1

Комплектация	Назначение	Маркировка
Системный блок	Для осуществления управления видеомонитором, пультовым терминалом, АСМ, АЦП и для обработки цифровых сигналов АЦП	IBM PC
Видеомонитор	Для отображения символьной и графической информации	ЖКИ
Пультовой терминал	Для ввода команд ИИК-1 оператором	
Аналоговый селектор – мультиплексор	Для переключения аналоговых выходов измерительных датчиков	АСМ
Метрический аналого-цифровой преобразователь	Для преобразования аналоговых сигналов в цифровой код для измерения усилия сжатия электродов	ADCS 5K/12-8
Усилитель сигналов	Для усиления сигнала датчика при измерении усилия сжатия электродов для стабилизации импульсов тока	AMP-8
Блок питания стабилизированный		
Датчик тока	Для измерения действующих значений электрического тока	БПС 3-15 В, ДТПХ-30
Делитель напряжения	Для измерения действующих значений напряжения	Коэффициент деления 118,8

Отличие и преимущества созданного устройства по сравнению с существующими приборами аналогичного назначения – осциллографами, самопищущими датчиками и т.п. заключаются в возможности непрерывной регистрации в режиме реального времени высокоточного изменения энергосиловых параметров с одновременной записью и обработкой цифровой информации с выработкой управляющего сигнала.

С помощью указанного устройства, подсоединяемого к серийному оборудованию любого класса и назначения, по разработанной методике согласно ОСТ 37.004.004.-74 и ТУ в режиме реального времени измеряли и регистрировали датчиком, основанном на эффекте Холла ДТПХ-5 и ДТПХ-30 на 5 А и 30 А соответственно, напряжение питания – 15 В; выходное напряжение – 2–6–10 В, импульсные напряжение и ток, частота, амплитуда и длительность импульса и их средние значения, средние интегральные значения тока и напряжения, одновременно записываемые в файл.; погрешность измерения в диапазоне рабочих температур, не более – 2%; нелинейность характеристик датчика, не более 3%.

Опрос каналов производили последовательно с частотой, определяемой возможностями АЦП и компьютера. При этом разработанные программы позволяли вводить задержку и использовать усреднение по количеству замеров, а также корректировать нуль датчика Холла. Для данных датчиков существует проблема ухода ноля, которую решали программным путем. Для учета нелинейности характеристик датчика и усилителя проводили сравнительные замеры и по ним получали аппроксимирующие формулы:  $A = ((V - V_0) \cdot 1.35) \cdot 1000$  – для ДТПХ-5,

$A = ((V - V_0) \cdot 7.8811247) \cdot 1000$  – для ДТПХ-30, где  $A$  – ток в мА,  $V$  – напряжение выдаваемое датчиком в В,  $V_0$  – напряжение выдаваемое датчиком при нулевом токе в В.

Для обработки импульсных сигналов выполняли моделирование их формы с последующим расчетом с помощью созданных компьютерных программ. В процессе экспериментов осуществляли индивидуальную калибровку каналов ИИК, для чего применяли потенциометр ПП-63 с классом точности 0,05 %. Для сигналов, по форме близких к треугольным или синусоидальным с произвольным распределением амплитуд, ошибка не превышала 0,05% для основной частоты работы установки МДО в 150 Гц.

Программно-аппаратное обеспечение блока измерения постоянных и импульсных токов и напряжений базируется на ряде разработанных компьютерных программ [4]. Корректировка результатов измерения напряжения производится с помощью разработанного и изготовленного делителя с коэффициентом деления 118,8 (рис. 2).

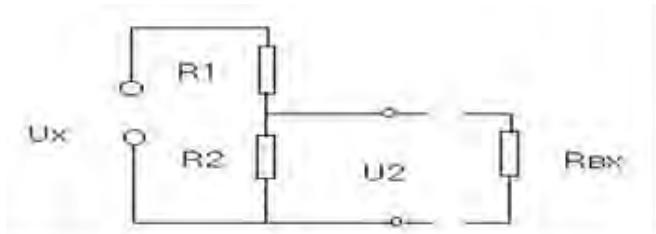


Рисунок 2. Делитель напряжения:  
 $U_x$  – входное напряжение,  $U_2$  – выходное напряжение,  
 $R_1$  и  $R_2$  – сопротивления плеч делителя,  
 $R_{bx}$  – входное сопротивление измерительного прибора (АЦП)

Для его расчета и моделирования была разработана соответствующая программа (Delitel.mcd), в которой заложены функции, позволяющие проводить оптимизацию делителя. Программа состоит из трех блоков.

Блок 1. Задают исходное напряжение  $U_x$ , желаемое напряжение  $U_2$ , сопротивление одного из плеч делителя, в данном случае  $R_2$ . При расчете учитывают входное сопротивление измерительного прибора  $R_{bx}$ , что позволяет использовать и приборы с низким входным сопротивлением. По заданным параметрам рассчитывают сопротивление второго плеча делителя, в данном случае  $R_1$ .

Блок 2. Используют для подбора  $R_1$  из ряда промышленно выпускаемых резисторов.

Блок 3. По подобранным в блоках 1 и 2 резисторам рассчитывают протекающие по ним токи и выделяющиеся на них мощности.

При неудовлетворительности полученных значений для достижения желаемого результата в блоках 1 и 2 изменяют соответствующие параметры.

Постоянные ток и напряжение измеряли в режиме реального времени, опрос каналов производили последовательно с частотой, определяемой возможностями АЦП и компьютера. При этом разработанные программы позволяли вводить задержку и использовать усреднение по количеству замеров, а также корректировать нуль датчика Холла.

При подключении к установке МДО делителя напряжения следует использовать стандартный делитель (входит в комплект осциллографа) с коэффициентом деления 1:100. Измерительный щуп подсоединяется к «+» установки МДО, корпусной щуп – к «-» установки.

С помощью АЦП измеряли эффективные значения импульсов напряжения и тока, длину положительных импульсов напряжения и тока, максимальные значения импульсов напряжения и тока, частоту импульсов напряжения и тока, число импульсов

напряжения и тока. Их настраивали согласно разработанному компьютерному меню «Параметры» (рис. 3).

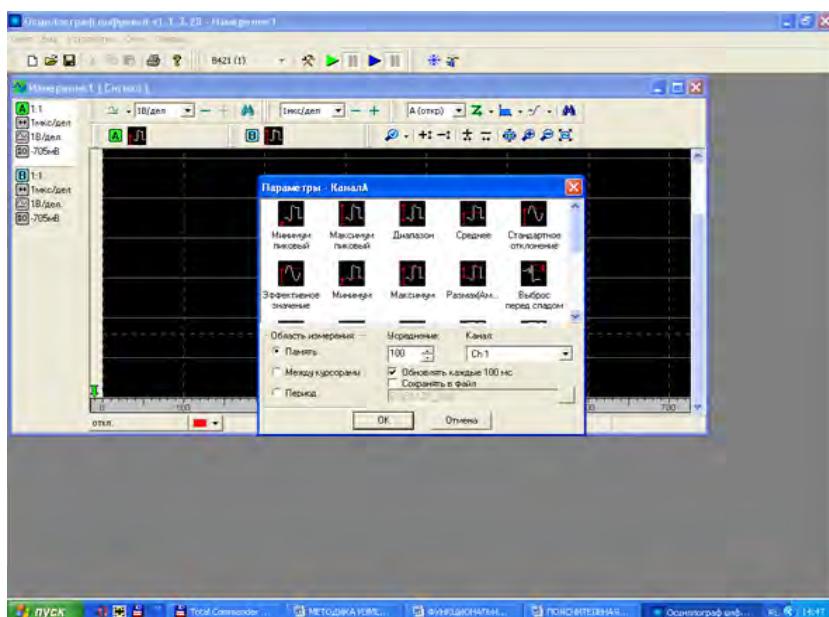


Рисунок 3. Меню «Параметры» АЦП В-421

Калибровку датчиков тока ДТПХ-5, ДТПХ-30, ДТПХ-50, ДТПХ-100 (цифра после буквенного обозначения указывает максимальный ток измерения) проводили на основе экспериментальных данных, полученных на гостированных приборах с точностью измерения не больше 2,5 %. Данные датчики работают на основе эффекта Холла и выдают напряжение, которое необходимо преобразовать в ток. Датчики построены таким образом, чтобы это преобразование было линейным (хотя при использовании более точных гостированных приборов можно проводить и нелинейную аппроксимацию, повышающую точность).

Полученные данные использовали для корректировки ПО, что позволило получить формулы учета нелинейности работы АЦП и усилителя AMP-8 для каждого канала. Измерения проводили с помощью источника тока, который замеряли гостированным прибором и также гостированным прибором замеряли выходное напряжение на датчике тока. По этим данным строили калибровочные таблицы, по которым и производили аппроксимацию посредством программы CurveExps (возможно применение и других программ и методов) (табл. 2).

Таблица 2. Калибровочная таблица

ДТПХ-50		ДТПХ-100	
Напряжение (В)	Ток (А)	Напряжение (В)	Ток (А)
6	0	6	0
6,38	5	6,18	5
6,45	6	6,38	10
6,71	10	6,58	15
7,1	15	6,78	20
7,45	20	7,15	30
8,2	30		

Результаты аппроксимации приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты аппроксимации

ДТПХ-50		ДТПХ-100	
у – Амперы х - Вольты	у – Вольты х - Амперы	у – Амперы х - Вольты	у – Вольты х - Амперы
Linear Fit: $y=a+bx$			
Coefficient Data:			
$a = -82.240158$ $b = 13.702239$ $s = 0.19111391$ $r = 0.99985492$	$a = 6.0022106$ $b = 0.072959601$ $s = 0.01394562$ $r = 0.99985492$	$a = -154.93578$ $b = 25.841174$ $s = 0.21457560$ $r = 0.99984213$	$a = 5.9958571$ $b = 0.038685714$ $s = 0.00830232$ $r = 0.99984213$

Примечание:  $s$  – стандартная ошибка,  $r$  – коэффициент корреляции

Полученные данные использовали для корректировки ПО, что позволило получить формулы учета нелинейности работы АЦП и усилителя AMP-8 для каждого канала.

В результате реализуемая точность измерения составила 0,1 мВ, для 0-го и 1-го каналов – 0,05%, для остальных – не менее 0,1%. Для сигналов, по форме близких к треугольным или синусоидальным с произвольным распределением амплитуд, для основной частоты 150 Гц при работе оборудования МДО ошибка не превышала 0,05%. На других частотах в пределах возможностей АЦП ошибка  $\leq 0,5\%$ .

Помимо фиксации электрических параметров процесса МДО выполняли оценку кинетики прироста толщины покрытия при изменении уровня электрического и механического воздействий на металлическую основу. При этом контролировали интенсивность возникающего в процессе обработки искрения, т.к. известно [4, 7, 8], что при микродуговом оксидировании оно меняет свои интенсивность и спектральные характеристики по ходу процесса, что является косвенным свидетельством изменений в уровне энергетического воздействия и происходящих в обрабатываемом материале структурных изменениях. Это находит свое отражение в интенсивности излучения и спектра сопровождающего указанные процессы искрения [9].

В связи с этим было разработано, изготовлено и опробовано устройство контроля и управления кинетикой нарастания толщины покрытий по продолжительности микроплазмоискровых воздействий (УККП) (рис. 4) на базе изменения «цвета искры» с алгоритмом, обеспечивающим оперативный, надежный и технологичный контроль качества формируемых покрытий, с получением достоверной информации о продолжительности процесса создания слоев определенных толщин, о начале их разрушения в режиме реального времени [6].

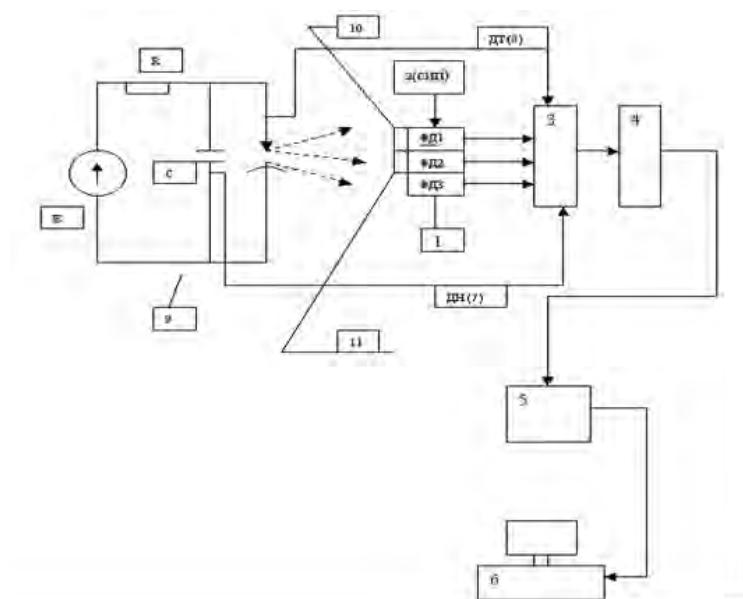


Рисунок 4. Структурная схема устройства для определения оптимальной продолжительности микродугового оксидирования:

- предположительности микрорадиовещания:

  - 1 – блок фотодиодов (ФД1, ФД2, ФД3);
  - 2 – стабилизированный источник питания (СИП);
  - 3 – многоканальный усилитель (У8);
  - 4 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 5 – системный блок;
  - 6 – терминал; 7 – датчик напряжения (ДН); 8 – датчик тока (ДТ);
  - 9 – установка электроискровой обработки; 10, 11 – светофильтры

Использование УККП позволяет решить поставленную задачу за счет достижения технического результата, сущность которого состоит в том, что в режиме реального времени удается контролировать электрические параметры и продолжительность микродуговой обработки, определяя и обеспечивая качество – толщину, высокие равнотолщинность и сплошность покрытия.

Алгоритм контроля базируется на свойствах света [9, 10].

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2} \quad (1)$$

где  $E$ ,  $I$ ,  $\alpha$ ,  $r$  – освещенность, сила света, угол между нормалью к поверхности и направлением на источник, расстояние до источника, соответственно.

Учитывая, что диаметр фотодиодов около 3 мм, можно считать  $\cos \alpha$  и  $r$  для них одинаковыми. Тогда отношения величин освещенности ЕФД 1 ЕФД 3 и ЕФД 2 / ЕФД 3 будут мало зависеть от направления на обрабатываемую деталь и расстояния до нее. Это дало возможность выделить спектральные яркости и по их изменению позволило судить о характере процесса нанесения покрытия.

### 3. Общий алгоритм экспериментов и исследований

Для оценки эффективности микродуговой обработки использовали энергетический подход. Методически определение скорости роста толщины покрытий выполняли на образцах одного размера в зависимости от условий их формирования до получения толщины слоя в 100 мкм. Цель – оптимизация величин электрических параметров МДО, определяющих минимальный расход энергии на образование покрытия требуемой толщины.

Созданный ИИК-1 с указанным программным и аппаратурным обеспечением, а также УККП подключали к серийному оборудованию МДО и с их помощью были получены осциллограммы изменения электрических параметров процесса в режиме on line и данные о яркости и интенсивности искрения в процессе микродугового оксидирования в различных по химической активности электролитах, одним из основных факторов, оказывающих влияние на динамику МДО и параметры формируемых покрытий: активированном разнозаряженными полирадикалами – ЭЩ1, активированном наличием в растворе УДА – ЭЩ2 и активированном ультразвуком – ЭЩ 3.

Расчет расхода энергии на образование покрытия толщиной 1 мкм определяли по формулам

$$P_i = U_i * t_i, \quad (2)$$

где  $P_i$  – мощность за измерительный цикл ( $Bm$ );  $U_i$  – эффективное напряжение за один измерительный цикл ( $B$ );  $t_1$  – время начала процесса;  $t_2$  – время окончания процесса;  $\Delta t = t_2 - t_1$  – длительность процесса ( $c$ );  $N$  – количество измерительных циклов.  $t_i = \Delta t / N$  – средняя длительность измерительного цикла ( $c$ );

$$A_i = P_i * t_i, \quad (3)$$

где  $A_i$  – энергия (работа) за измерительный цикл ( $Дж$ ).

Тогда

$$A = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^N P_i * \frac{\Delta t}{N}, \quad (4)$$

где  $A$  – энергия (работа) за время протекания процесса ( $Дж$ );  $I_i$  – эффективный ток за один измерительный цикл ( $A$ );  $A_{мкм} = A / h$  – энергия (работа) затраченная на рост 1 мкм покрытия ( $Дж/мкм$ );  $h$  – толщина покрытия (мкм).

Расчет скорости роста покрытия осуществляли по формуле:

$$V_{мкм} = h / \Delta t, \quad (5)$$

где  $V_{мкм}$  – скорость роста покрытия (мкм/мин).

На осциллограммах изменения в режиме реального времени токовых характеристик при протекании процесса МДО в электролитах различной химической активности с помощью подключенных устройств удалось зафиксировать заметное различие в их уровнях: если в стандартном электролите ЭЩ при МДО в гальваниостатическом режиме средние значения тока соответствуют заданным с помощью оборудования, то в активированных растворах при прочих равных задаваемых параметрах оксидирования – плотности тока, времени обработки и одинаковых размерах оксируемых образцов были отмечены более высокие, в 1,5 – 2,6 раза, значения тока и напряжения (рис. 5).

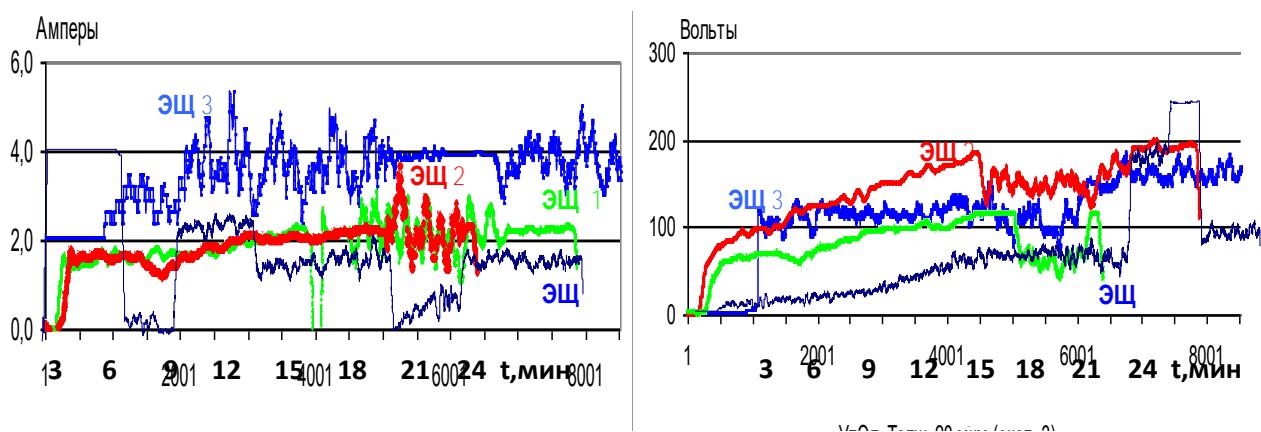


Рисунок 5. Изменение электрических параметров АМДО в режиме реального времени  
Электролиты: ЭЩ – стандартный, ЭЩ 1 – химически активированный, ЭЩ 2 –  
активированный заряженными полирадикалами, ЭЩ 3 –активированный  
ультразвуковым полем

#### 4. Заключение

В результате проведенной работы по автоматизации процесса МДО с целью информационно-аналитического обеспечения приемов управления многофакторной системой «металл – управляющее воздействие – среда – покрытие» при микродуговой обработке (МДО) были разработаны и опробованы:

1. Автоматизированный информационно-измерительный комплекс (ИИК), позволяющий осуществлять высокоточные измерения и регистрацию в режиме реального времени с одновременным выводом полученных графиков на дисплей электрических характеристик МДО на основе созданного программного обеспечения и методики измерения и регистрации в режиме online постоянных напряжения и тока.

2. Устройство контроля и управления кинетикой нарастания покрытий по продолжительности микроплазмоискровых воздействий (УККП).

Подключение данных устройств к специализированным установкам МДО и применение разработанных методик оперативного, надежного и технологичного контроля качества формируемых покрытий, позволило:

3. Фиксировать усредненные данные импульсных напряжения и тока с определением определением числа импульсов, их высоты, длительности и средних

значений, обеспечило получение мгновенной достоверной информации о продолжительности процесса создания слоев определенных толщин и качества, а также о начале их разрушения.

4. Установить экспериментально с помощью разработанных устройств, что при стандартной работе серийного МДО-оборудования в активированных электролитах происходит интенсификация анодно-катодных взаимодействий с ускорением в 1,5–2,5 раза массопереноса и эффектом повышения на 20–25 % электрической активности растворов.

5. Зафиксировать в активированном ультразвуком электролите возрастание амплитуд импульсов тока и напряжения на 87% и 67% соответственно и повышение их частоты на 90%, что связано с увеличением давления в зоне пробоя и созданием упруго-деформационного поля с высоким уровнем энергии в виде излучения ультразвука. Возникающие при этом ударные волны наклепывают оксидируемую поверхность, поддерживают высокую температуру в реакционной зоне, продлевая стадию термолиза в электролите. В результате происходит ускоренный в 1,3–2,8 раза рост толщины формируемых оксидных покрытий, снижение их пористости с 40 % до 1–3 % и сокращение энергозатрат на их получение более, чем в 2,5 раза [1].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Чигринова, Н. М. Анодное микродуговое оксидирование: проблемы, решения, перспективы /Н. М. Чигринова // Монография. Мн.: Изд-во «Бестпринт». – 2019.– 299 с. ISBN 978-985-90509-4-7.
2. Yerokhin, A. L. Plasma electrolyte fabrication of oxide ceramic surface layers on aluminium alloys / A. L. Yerokhin, A. A. Voevodin, V. V. Lyubimov, J. S. Zabinski, M. S. Donley // Surface and coating Technology.–1998.– № 3(110). – Pp. 140–146.
3. Баковец, В. В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В. В. Баковец, О. В. Поляков, И. П. Долговесова. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1990. – 168 с. ISBN 978-5-94836-266-3.
4. Слонова, А. И. Защита металлов / А. И. Слонова, О. П. Терлеева, Г. А. Марков. – 1997. – Т. 33, № 2. – С. 208
5. Чигринова, Н. М. Перспективы применения автоматизированных информационно-измерительных систем для управления и оптимизации электрофизических параметров микроплазмоискровых технологий / Н. М. Чигринова, А. В. Дроздов // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: материалы Междунар. конф., С.-Петербург, 30 мая 2005 г. – С.-Петербург, 2005. – С. 52–55.
6. Чигринова, Н. М. Автоматизированные комплексы для контроля энергосиловых параметров при микроплазмоискровой обработке объектов / Н. М. Чигринова, В. Е. Чигринов // Пленки и покрытия – 2005: материалы 7 Междунар. конф., С.-Петербург, 24–26 мая 2005 г. – С.-Петербург, 2005. – С. 4–6.
7. Чигринова, Н. М. Инновации в электроискровых технологиях: теория и практика /Н. М. Чигринова // Монография.– Минск, Изд-во « Бестпринт». –2018.– 262 с. ISBN 978-985-6963-91-2.
8. Марков, Г. А. Стадийность в анодно-катодных микроплазменных процессах / Г. А. Марков [и др.] / Электрохимия. – 1989. – Т. 25, вып. 11. – С. 1473–1479.
9. Гулаков, И. Р. Регистрация ионизирующих излучений : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности “Ядерные физика и технологии” / И. Р. Гулаков. – Минск: Вышэйшая школа, 2021. – 286 с.: ил., табл.

ISBN 978-98506-3309-5.

10. Спектроскопия и люминесценция молекулярных систем / Д. С. Умрейко [и др.] под ред. Е. С. Воропай, К. Н. Соловьев, Д. С. Умрейко ; Белорусский государственный университет, Национальная академия наук Беларуси (Минск). – Минск: Издательство БГУ, 2002. – 399 с.: ил. ISBN 985-445-542.4

Поступила в редакцию 24.03.2025 г.

**F. I. Panteleenko**, a member- correspondent. NAN B, Ph. D., Professor, **V. A. Okovity**, Ph. D., **O. G. Devoino**, Ph. D., Professor, **T. I. Bendik**, Ph. D., **V. V. Okovity**, **A. A. Litvinko**, 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)*

## **RESTORATION OF WORN SURFACES OF PARTS BY PLASMA SPRAYING OF COMPOSITE COATINGS**

*The article describes the technology for restoring and strengthening worn surfaces of parts by plasma spraying of composite coatings made from m-rolls. The composition of the powders was selected taking into account the following premises. The oil-retaining ability of the applied coatings is ensured by the Ni, Cr, Fe component. The number of ion-dipole bonds between metal ions and oil dipole groups increases, the oil-retaining ability of the metal surface and its wear resistance increase. The hardness of the applied coatings is ensured by carbide inclusions. At the same time, the degree of deformation of the friction surface of the coatings and the area of actual contact of the run-in tribological interfaces decreases. Conditions are created to improve the anti-friction properties of friction pairs. The combination of components in powders ensures the formation of sawn coatings with a friction-friendly structure of hard carbide inclusions distributed in a relatively soft matrix. Recommendations are given on optimal plasma spraying modes and areas of application of restored parts. The structure of coatings obtained using optimal technology consists of a solution (binder, matrix) and carbide inclusions. This structure is characterized by oil-retaining ability and hardness, creating the prerequisites for wear resistance and improving the anti-friction properties of the surface restored by spraying. Oil-holding capacity is ensured by the presence of nickel, iron, carbon, chromium, which determine the effective interaction of the lubricant and coating due to forces of physical and chemical nature. Increased hardness of the layers is provided by the carbide phase. The surface of such a coating is characterized by significant fluctuations in hardness with low values in certain extended areas formed mainly by the binder material.*

**Key words:** plasma spraying processes, powder compositions, plasma spraying in air, metal alloys based on m-rolls, performance characteristics, morphology and structure.

**Ф. И. Пантелейенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, Т. И. Бендик, В. В. Оковитый, А. А. Литвинко, В. М. Асташинский**

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ**

*В статье описана технология восстановления-упрочнения изношенных поверхностей деталей плазменным напылением композиционных покрытий из м-кроллей. Состав порошков выбран с учетом следующих предпосылок. Маслоудерживающая способность наносимых покрытий обеспечивается компонентом Ni,Cr,Fe. Возрастает количество ион-дипольных связей между ионами металла и дипольными группами масла, повышается маслоудерживающая способность поверхности металла и его износостойкость. Твердость наносимых покрытий обеспечивается карбидными включениями. При этом уменьшается степень деформации поверхности трения покрытий и площадь фактического контакта приработанных трибосопряжений. Создаются условия для улучшения антифрикционных свойств пар трения. Сочетание в порошках компонентов обеспечивает формирование напыленных покрытий с благоприятной для трения структурой из твердых карбидных включений, распределенных в относительно мягкой матрице. Даны рекомендации по оптимальным режимам плазменного напыления и области применения восстановленных деталей.*

*Структура полученных по оптимальной технологии покрытий состоит из раствора (связующего вещества, матрицы) и карбидных включений. Эта структура характеризуется маслоудерживающей способностью и твердостью, создающими предпосылки износостойкости и улучшения антифрикционных свойств восстановленной напылением поверхности. Маслоудерживающая способность обеспечивается наличием никеля, железа, углерода, хрома, которые обуславливают эффективное взаимодействие*

© Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Bendik, T. I., Okovity V. V., Litvinko A. A., Astashinsky V. M.; 2025

ствии смазки и покрытия за счет сил физической и химической природы. Повышенная твердость слоев обеспечивается карбидной фазой. Для поверхности такого покрытия свойственны существенные колебания твердости с невысокими ее значениями на отдельных протяженных участках, сформированных в основном связующим материалом.

**Ключевые слова:** процессы плазменного напыления, порошковые композиции, плазменное напыление на воздухе, металлические сплавы на основе м-кролей, эксплуатационные характеристики, морфология и структура.

## 1. Introduction

The processes of friction and wear of parts significantly affect the performance of machines and units. When machines fail and are repaired, the problem of replacing worn parts made of expensive alloy materials often arises. To solve this problem, various technologies are increasingly being used to restore the size and shape of worn surfaces by applying compensating coatings that simultaneously perform protective functions. The experience of the CIS countries, Switzerland, Germany, Japan and others indicates that an effective way to apply wear-resistant protective coatings is plasma spraying [1-3]. Its main advantage is the ability to spray materials of various compositions and properties, the number of which is constantly increasing. In this case, research into the technology of plasma deposition of the created materials is necessary. The purpose of the proposed research is to develop a technology for restoring the size and shape of worn parts by plasma spraying of composite coatings [5-10]. The research concerns coatings on parts operating under friction conditions with boundary, imperfect lubrication. Such conditions are typical for many critical tribo-interfaces, for example, an internal combustion engine. The object of research is coatings obtained by plasma spraying of NiCrAlY-40% TiC and FeCrAlY-40% TiC composite powders. The composition of the powders was selected taking into account the following prerequisites [2]:

- the oil-retaining ability of the applied coatings is ensured by the Ni, Cr, Fe component. The number of ion-dipole bonds between metal ions and oil dipole groups increases, the oil-holding capacity of the metal surface and its wear resistance increase;

- the hardness of the applied coatings is ensured by carbide inclusions. At the same time, the degree of deformation of the friction surface of the coatings and the area of actual contact of the run-in tribo-couplings decreases. Conditions are created to improve the antifriction properties of friction pairs;

- the combination of components in powders ensures the formation of sown coatings with a structure favorable for friction from hard carbide inclusions distributed in a relatively soft matrix.

## 2. Research methodology

When developing a technology for restoring the size and shape of worn surfaces by plasma spraying of composite coatings, the following technological parameters were optimized: plasmatron arc current; spraying distance; flow rate of plasma-forming gas-nitrogen; consumption of transport gas - nitrogen. The optimization criteria are the coefficient of use of sprayed powder materials (CPM) and the structure of the applied coatings. The utilization coefficient makes it possible to estimate the number of applied particles that did not form a coating due to insufficient ductility and flight speed. This, in turn, makes it possible to evaluate the degree of particle heating, distance and other spraying modes. Optimized modes are those with maximum values of the instrumentation factor, which correspond to increased cohesive and adhesive strength of coatings. The coefficient of powder utilization was determined on samples in the form of a steel sheet measuring 200x200x2 mm, which had undergone jet-abrasive preparation, cleared of abrasive and having a clearly marked spraying zone of 80x80

mm in the center. Jet-abrasive preparation was carried out with grains of solid electrocorundum 22000-26000 MPa. The surface roughness of the sample after preparation should be Ra 12.5-25  $\mu\text{m}$ . In parallel, a series of experiments was carried out with the application of coatings with a thickness of 0.4-0.5 mm on flat steel samples measuring 30x15x3 mm. At the same time, the structure of the coatings was studied when changing the modes of their plasma spraying. The structure was analyzed on thin sections of the cross section of the deposited layers using a Nanolab-7 scanning electron microscope (Germany) and a Unimet light microscope (Japan). The analysis took into account that to increase the cohesive strength and wear resistance of coatings, a dense structure of sown materials is required. Plasma spraying was carried out in air, the particle sizes of the applied powder materials were in the range of 40-100 microns. To increase the adhesion strength of the coatings, a sublayer of NiCr adhesive was preliminarily applied to the steel substrate. Sputtering was carried out using a UPU-3D installation.

### 3. Research results and discussion

The technological parameters for the restoration of worn parts by plasma spraying of composite coatings, optimized based on research results, are presented in Table. 1 и on figure 1-4. The structure of coatings obtained using optimal technology consists of a solution (binder, matrix) and carbide inclusions, Fig. 5. This structure is characterized by oil-retaining ability and hardness, which create the prerequisites for wear resistance and improved anti-friction properties of the even forces of physical and chemical nature. The increased hardness of the layers is provided by the carbide phase. The surface of such a coating is characterized by significant fluctuations in hardness with low values in certain extended areas formed mainly by the binder material. When the protective coating is used under friction conditions, these areas are easily deformed by the tribo-coupling counterbody with the formation of closely adjacent conjugate zones, which are prone to micro-contact seizure and scuffing. The performance of the wear-resistant coating and the friction unit as a whole decreases.

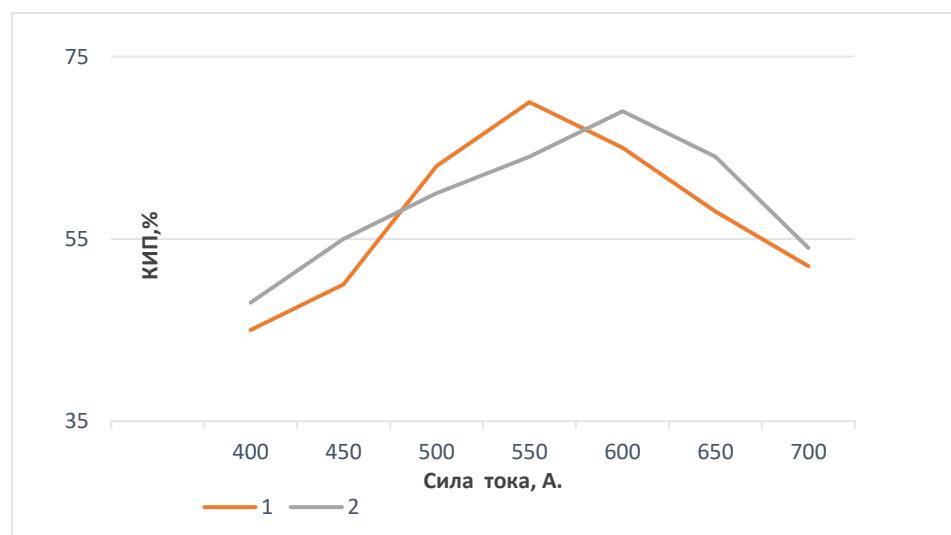


Figure 1. The influence of the values of the current supplied to the plasma torch (I, A) on the obtained KIM indicators, % for powder materials 1- NiCrAlY -40% TiC, 2-FeCrAlY-40% TiC (powder fraction 50...63  $\mu\text{m}$ , L=110 mm, R por.=4.0 kg/hour, RN2 =55 l/min).

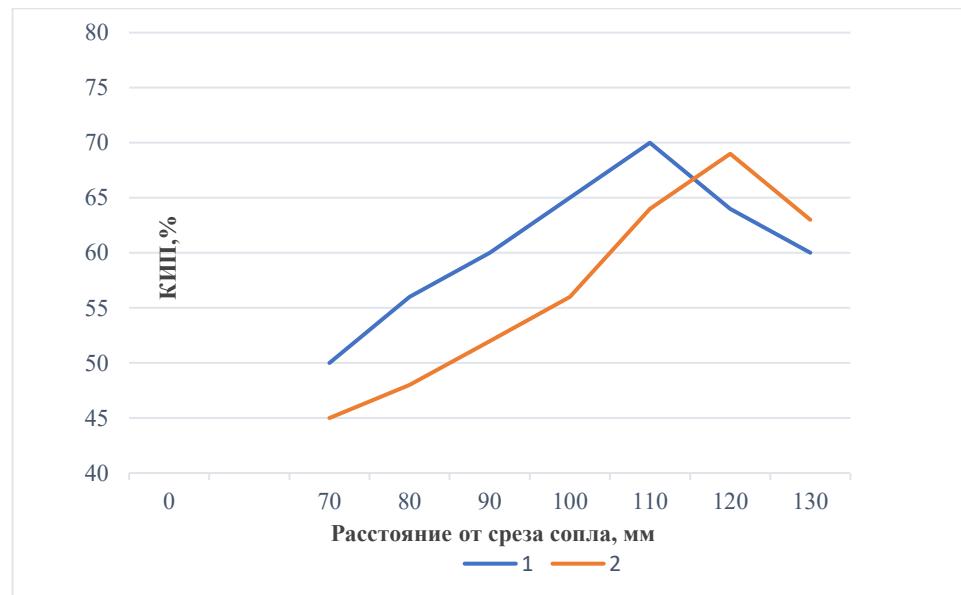


Figure 2. The obtained dependence of the values of the KIP, % on the applied distance of the spraying process L, mm for the applied powder material 1- NiCrAlY -40 % TiC (powder fraction 50...63  $\mu$ m, I=550 A; R por.=4.0 kg/hour, RN =55 l/min), 2-FeCrAlY-40 % TiC (powder fraction 50...63  $\mu$ m, I=600 A, R por.=4.0 kg/hour, RN =60 l/min).

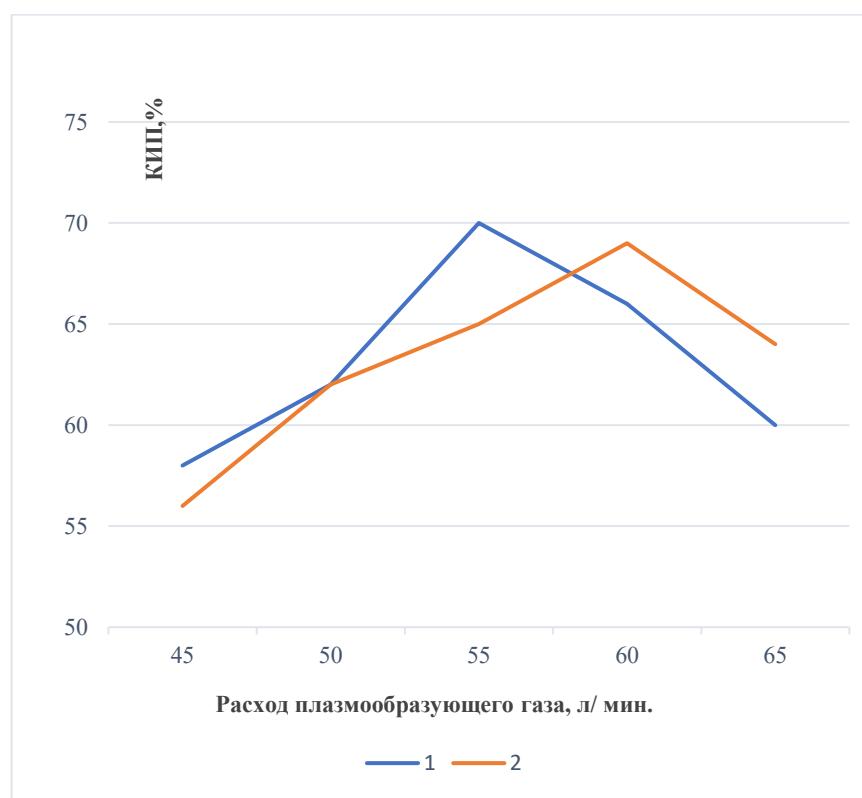


Figure 3. The obtained values of the instrumentation and control, % of the consumption of the plasma-forming gas nitrogen for the applied powder material 1- NiCrAlY -40 % TiC (powder fraction 50...63  $\mu$ m, I=550 A; R por.=4.0 kg/hour, L=110 mm), 2-FeCrAlY-40 % TiC (powder fraction 50...63  $\mu$ m, I=600 A, R por.=4.0 kg/hour, L=120 mm).

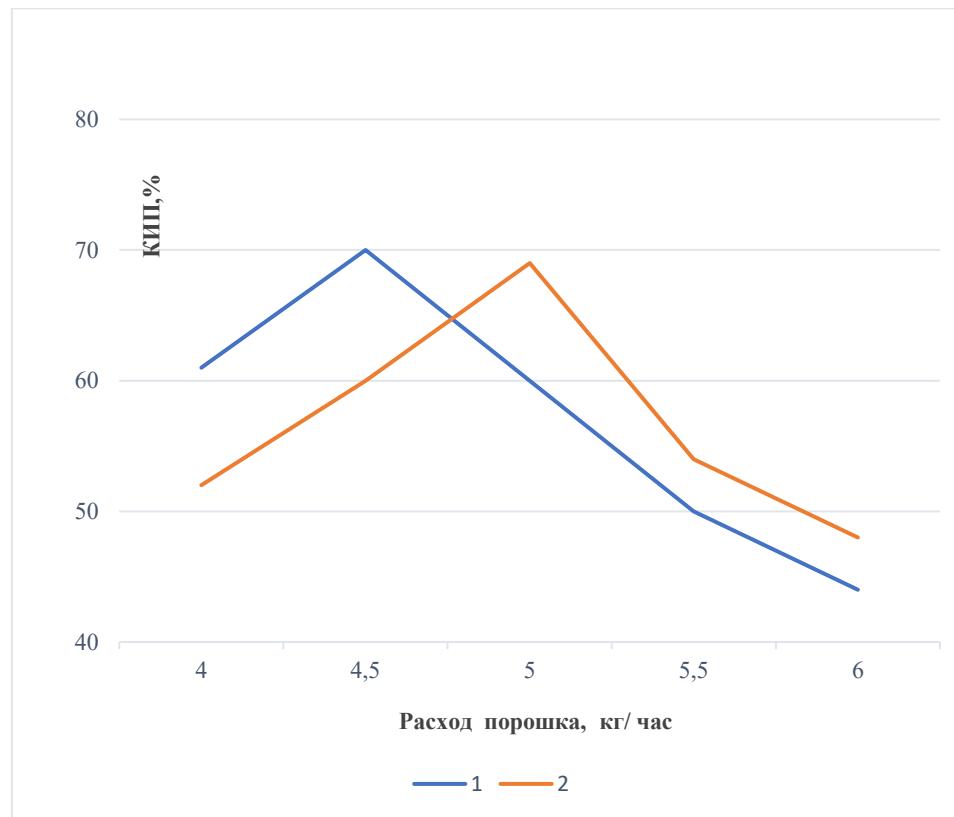


Figure 4. Obtained values of the instrumentation and control, % of powder consumption for the powder material used in the spraying process: 1- NiCrAlY -40 % TiC (powder fraction 50...63  $\mu$ m, I=550 A; R N2=55 l/min, R por.=4.5 kg/hour, L=110 mm), 2-FeCrAlY-40 % TiC (powder fraction 50...63  $\mu$ m, I=600 A, R por.=5.0 kg/hour, R N2=60 l/min, L=120 mm).

Table 1. Technological parameters for restoring worn partse surface restored by spraying.

Sprayed powder material	Spray modes				
	Plasmatron arc current, A	Arc voltage, V	Consumption of plasma-forming gas - nitrogen, l/min	Consumption of sprayed powder, kg/h	Spraying distance, mm
NiCrAlY -40 % TiC	550	55	55	4,5	110
FeCrAlY-40 % TiC	600	65	60	5,0	120

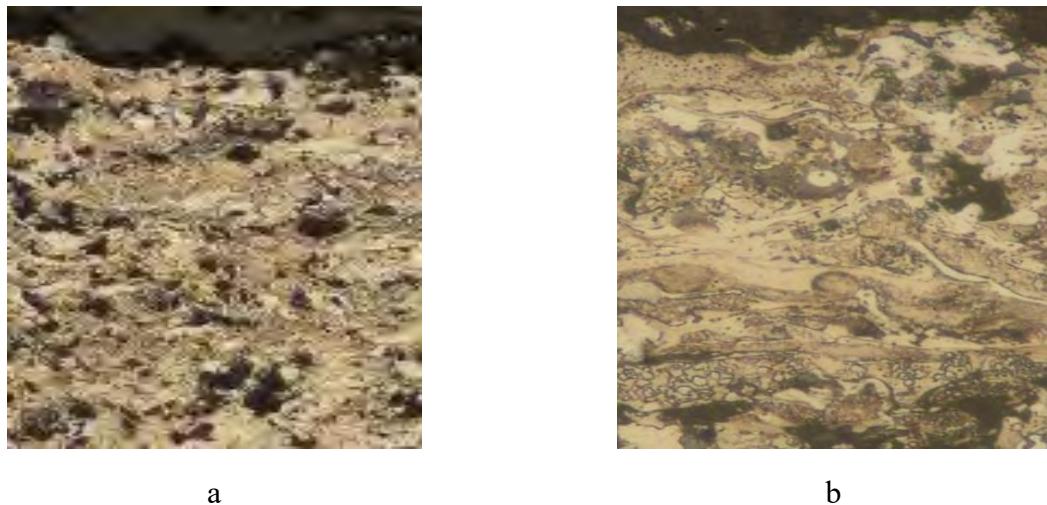


Figure 5. Structures obtained after plasma spraying at different values of plasma-forming nitrogen gas: a-NiCrAlY-40% TiC, b-FeCrAlY-40% TiC.

The photograph of a thin section of the coating is characterized by an increased number of dark areas of complex shape, which are zones of chipping of the carbide phase and pores, Fig. 1. This is due to the technology of manufacturing sections and an excess of the carbide phase in the coatings. The surface of such a coating is characterized by significant fluctuations in hardness with low values in certain extended areas formed mainly by the binder material. When the protective coating is used under friction conditions, these areas are easily deformed by the tribo-coupling counterbody with the formation of tightly adjacent mating zones, which are prone to micro-contact seizure and scuffing. The performance of the wear-resistant coating and the friction unit as a whole decreases. The photograph of a thin section of the coating is characterized by an increased number of dark areas of complex shape, which are zones of chipping of the carbide phase and pores, Fig. 1. This is due to the technology for preparing sections and the excess of the carbide phase in the coatings. Laboratory tests on an Armsler type machine confirmed the wear resistance of the coatings under consideration under boundary lubrication conditions. The resulting compositions are characterized by maximum wear resistance and antifriction properties. For example, the wear resistance of such coatings is 2-3 or more times higher than the same parameter for steel 45 with a hardness of 484-544 HV (48-52 HRC).

### 3. Conclusion

A technology has been developed for restoring and strengthening worn surfaces of parts by plasma spraying of composite coatings. At the same time, the technological parameters of applying materials in the form of initial composite powders NiCrAlY-40% TiC and FeCrAlY-40% TiC were investigated and optimized. The optimization criteria were the utilization rate of the sprayed powder and the coating structure. The following optimal spraying modes have been established: plasmatron arc current – 550-600 A; spraying distance – 110-120 mm; consumption of plasma-forming gas – nitrogen – 55-60 l/; consumption of sprayed powder – 4.5-5.0 kg/h. The coatings are characterized by maximum wear resistance, which is 2-3 or more times higher than the same parameter for steel 45 with a hardness of 484-544 HV (48-52 HRC). It is advisable to use the developed coating technology for the restoration and strengthening of machine parts operating under friction conditions with boundary, imperfect lubrication.

## LITERATURE

1. Panteleenko, F. I. Formation and study of multilayer composite plasma coatings based on M-crowns and oxide ceramics with subsequent high-energy effects / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Devoino O. G. , Volodko A. S., Astashinsky V. M., Uglov V. M. // International collection of scientific works of the Donetsk National Technical University “Progressive technologies and mechanical engineering systems”, DonNTU - Donetsk.-2021.No.2.-P.68-83.
2. Panteleenko, F. I. Modern application of metal-ceramic coatings based on metal-chromium-aluminum-yttrium systems (M-crawls) / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Okovity V. V., Volodko A. V., Astashinsky V. M. // International collection of scientific works of the Donetsk National Technical University “Progressive technologies and mechanical engineering systems”, DonNTU - Donetsk.-2021.No.3.-P.72-81.
3. Panteleenko, F. I. Formation and study of multilayer composite plasma coatings / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., V. V. Uglov, V. I. // Bulletin of Gomel State Technical University. №2. 2021.P.15-27.
4. Panteleenko, F. I. Review of modern application of metal-ceramic coatings / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M. // Bulletin of Kuzbass State Technical University. No. 3.2021. pp. 5-17.
5. Okovityy, V. A. Optimization of the process of applying coatings from metal-ceramic powders using plasma spraying methods in air / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. // “Science and Technology”, BNTU – Minsk. -2021. Issue 5.- P.369-374.
6. Panteleenko, F. I. Selection of optimal parameters for applying multilayer plasma coatings from materials based on nickel M-crowns / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Svitala F., Blumenstein V. M. // Bulletin of Kuzbass State Technical University. 2022. No. 1. P.12-22.
7. Panteleenko, F. I. Options for spraying multilayer coatings from ceramic powders and M-crowns / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Astashinsky V. M. // International collection of scientific works of the Donetsk National Technical University “Progressive technologies and mechanical engineering systems”, DonNTU - Donetsk.-2022.No.1(76).P.66-72.
8. Panteleenko, F. I. Optimization of technological parameters for processing multilayer plasma coatings with a continuous laser / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoyno O. G., Sidorov V. A., Litvinko A. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Blumenshtein V. M. // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023. P.24-33.
9. Panteleenko, F. I. Aspects of creating multilayer coatings by plasma spraying / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoyno O. G., Litvinko A. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Blumenshtein V. M. // “Science and Technology”, BNTU - Minsk. - No. 3. 2023.P.179-185.
10. Panteleenko, F. I. Study of the structure and properties of multilayer plasma powder coatings made of ceramics and nickel-based alloys. / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoyno O. G., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Blumenstein V. M. // “Science and Technology”, BNTU - Minsk. -2024. P.15-20.

Поступила в редакцию 12.02.2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Антонова Н. М., Симонов А. И., Василевич В. В. АДГЕЗИЯ И МОРФОЛОГИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИИЗОБУТИЛЕНА.....	3
Башков А. А., Иванов С. В., Михайлов А. М., Рябов Д. А., Акулова А. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ И ЕГО СТРУКТУРЫ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ.....	10
Горобец И. А., Горбань В. В. СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИИ 8D – ПРИНТЕРА.....	21
Матвиенко С. А. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	28
Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б. К ВОПРОСУ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛОВОЗОВ.....	36
Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗУБЬЕВ КПП БЕЗ РАЗРЫВА ППМ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НАПЫЛЕНИЕМ.....	46
Плотников С. А., Смольников М. В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДВС.....	56
Харченко А. О., Корчевский С. В., Харченко А. А. ПРОГРЕССИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЗАТЫЛОВАНИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ МЕТЧИКОВ.....	63
Чигринова Н. М. ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ.....	73
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Bendik, T. I., Okovity V. V., Litvinko A. A., Astashinsky V. M. RESTORATION OF WORN SURFACES OF PARTS BY PLASMA SPRAYING OF COMPOSITE COATINGS.....	84

**ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ**

<b>Акулова А. А.</b>	<b>10</b>
<b>Антонова Н. М.</b>	<b>3</b>
<b>Башков А. А.</b>	<b>10</b>
<b>Василевич В. В.</b>	<b>3</b>
<b>Горбань В. В.</b>	<b>21</b>
<b>Горобец И. А.</b>	<b>21</b>
<b>Иванов С. В.</b>	<b>10</b>
<b>Корчевский С. В.</b>	<b>63</b>
<b>Котляров Б. С.</b>	<b>36, 46</b>
<b>Котляров В. Б.</b>	<b>36, 46</b>
<b>Котляров С. Б.</b>	<b>36, 46</b>
<b>Матвиенко С. А.</b>	<b>28</b>
<b>Михайлов А. М.</b>	<b>10</b>
<b>Михайлов А. Н.</b>	<b>36, 46</b>
<b>Плотников С. А.</b>	<b>56</b>
<b>Рябов Д. А.</b>	<b>10</b>
<b>Симонов А. И.</b>	<b>3</b>
<b>Смольников М. В.</b>	<b>56</b>
<b>Харченко А. А.</b>	<b>63</b>
<b>Харченко А. О.</b>	<b>63</b>
<b>Чигринова Н. М.</b>	<b>73</b>
<b>Astashinsky V. M.</b>	<b>84</b>
<b>Bendik T. I.</b>	<b>84</b>
<b>Devoino O. G.</b>	<b>84</b>
<b>Okovity V. A.</b>	<b>84</b>
<b>Okovity V. V.</b>	<b>84</b>
<b>Panteleenko F. I.</b>	<b>84</b>
<b>Litvinko A. A.</b>	<b>84</b>

## **ПРАВИЛА**

**представления материалов в международный сборник научных трудов**  
**ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»**  
**«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 .

3. Сборник имеет сайт <http://ptsm.donntu.ru> ДонНТУ, г. Донецк.

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 вибраабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения. Наукоемкие 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 адресу: [mnik21@mail.ru](mailto:mnik21@mail.ru)

## **ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ**

1. Текст статьи выполняется объемом от 7 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 и 7.12), полное название организаций и стран, тел./факс, E-mail, название статьи, аннотация на языке статьи, ключевые слова, основной текст, заключение или выводы, список литературы, дополнительная аннотация на английском языке с ключевыми словами, внизу первой страницы необходимо указать авторский знак - ©. УДК печатать прописными (жирными) буквами в верхнем правом углу не отступая от верх-

него 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, \*.pcx, \*.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 представлены 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)**

В 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.; 2025 (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:**

Российская Федерация, 283001, ДНР, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра «Технология машиностроения», Редакционная коллегия сборника «Прогрессивные технологии и системы машиностроения».

Тел.: +7 856 3010840, +7 856 3010805;

Тел. моб.: +7 949 306-08-79.

E-mail: [mnik21@mail.ru](mailto:mnik21@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)**

(пустая строка - 12 pt)

**И. И. Иванов**, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР (12 pt)

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, 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)

B 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 SYNTHESES 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 (рисунок 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:

© Иванов И.И., Петренко П.П.; 2022 (приводится внизу первой страницы статьи, 10 pt)

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов

.....  
..... отличительной особенностью данной методики.

2. Установить закономерности

.....  
.....  
..... позволили произвести процесс итерации.

3. Разработать рекомендации

.....  
..... 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. Алексин //Наукоемкие технологии в машиностроении: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – М: Машиностроение. – 2024. - № 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, 2025. – 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 1 (88)' 2025

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 02.06.2025 г.  
Формат 60x84<sup>1/16</sup>. Бумага Maestro.  
Гарнитура «Times New Roman». Печать лазерная.  
Усл. печ. л. 4,01. Уч.-изд. л. 4,26. Тираж 300 экз.

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