

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования

«Севастопольский государственный университет»

**№ 1(29)**

**2023**

---

Выходит 4 раза год

# ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Сборник научных трудов**

---

Севастополь 2023

---

*Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Севастопольский государственный университет»*

**ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2023 г. №1 (29)**

*Сборник научных трудов. Издание основано в 2016 году. Периодичность - 4 номера в год.  
Свидетельство о регистрации средства массовой информации выдано Федеральной службой по надзору в сфере  
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.*

*Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)  
и размещается в научной электронной библиотеке (Elibrary.ru)*

*Свидетельство о регистрации в национальном центре ISSN и присвоение международного стандартного номера  
серийного издания (International Standard Serial Number) 2618-8201 от 06.07.2018 г.*

*В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:  
2.5.6 Технология машиностроения, 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической  
обработки, 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы;  
2.6.17. Материаловедение (по отраслям)*

**Главный редактор:**

*д.т.н., проф. Братан С.М.*

**Зам. главного редактора:**

*к.т.н., доц. – Рошупкин С.И.*

**Научный редактор:**

*к.т.н., проф. Харченко А.О.*

**Отв. секретарь:**

*д.т.н., проф. Покинтелица Н.И.*

**Редакционная коллегия**

*Абдулгизис У.А. д. т. н., проф. (г. Симферополь), Глезер А. М. д. ф-м. н, проф. (г. Москва),  
Бохонский А.И. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Дуюн Т.А. д. т. н., доц. (г. Белгород),  
Козлов А.М. д. т. н., проф. (г. Липецк),  
Копп В.Я. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Малышева Г.В. д. т. н., проф. (г. Москва),  
Носенко В.А. д. т. н., проф. (г. Волжский), Обжерин Ю.Е. д. т. н., проф. (г. Севастополь),  
Новоселов Ю.К. д. т. н., проф. (г. Севастополь),  
Суслов А.Г. д. т. н., проф. (г. Москва), Федонин О.Н. д. т. н., проф. (г. Брянск),  
Ярошенко А.А. д. т. н., проф. (г. Севастополь)*

Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.  
Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».  
Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.

Дата выхода в свет: 23.12.2023 г.

Тираж: 30 экз.

Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 106, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;  
Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1362; e-mail: [vst\\_sevsu@mail.ru](mailto:vst_sevsu@mail.ru)  
Адрес издателей: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября,  
д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул.  
Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация.  
Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Криворогова А.С., Долматов А.В., Ильиных С.А., Ильиных Н.И., Гельчинский Б.Р.</b> Оценка адгезионно-когезионных свойств плазмонапыленных Ni-Cr-B-Si-C покрытий на образцы из алюминиевого сплава АК7ч.....                                                                | 4  |
| <b>Братан С.М., Часовитина А.С.</b> Влияние относительных вибраций инструмента и заготовки на радиальную силу резания при внутреннем шлифовании.....                                                                                                                         | 12 |
| <b>Джемалядинов Р. М., Валиев Э. В., Ибрагимов С. К., Абкеримов М. Р.</b> Усовершенствование динамической балансировки вала методом трех пусков.....                                                                                                                         | 18 |
| <b>Харченко А.О., Корчевский С.В.</b> Анализ схем и методов затылования зубьев рабочей части мелкогабаритных метчиков.....                                                                                                                                                   | 21 |
| <b>Перетягин Н.Ю., Ундрицова Н.Г., Перетягин П.Ю., Янушевич О.О., Крихели Н.И., Крамар О.В., Ноздрина М.С.</b> Исследование влияния добавок оксида графена на трибологические свойства керамоподобного покрытия, полученного на сплаве ВТ6 микро-дуговым оксидированием..... | 30 |
| <b>Журавлёв А.В., Чекалова Е.А., Овчинников В.В.</b> Исследование механических свойств дискретного оксидного слоя на инструментальном материале.....                                                                                                                         | 38 |

УДК 621.793; 620.172

## ОЦЕНКА АДГЕЗИОННО-КОГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫХ NI-CR-B-SI-C ПОКРЫТИЙ НА ОБРАЗЦЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК7Ч

*А.С. Криворогова<sup>1,2</sup>,  
А.В. Долматов<sup>2</sup>,  
С.А. Ильиных<sup>2</sup>,  
Н.И. Ильиных<sup>2</sup>,  
Б.Р. Гельчинский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ФГБУ «Судебно – экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Свердловской области», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования адгезионно-когезионных свойств Ni-Cr-B-Si-C покрытий, нанесенных методом до- и сверхзвукового плазменного напыления на алюминиевую подложку марки АК7ч. Выявлено, что при трехточечном изгибе разрушение образца происходит в напыленном слое, в месте перегиба наблюдается частичное отслоение покрытия от основы. Разрушения подложки не наблюдается. Деформация в покрытии обусловлена действием растягивающей нагрузки на поверхность. Для изделий, подвергающихся механическим деформациям в результате ударов, перегибов, сжатий, рекомендуемая толщина напыленного слоя составляет 0,13-0,14 мм. Для образцов, которые не подвергаются механическим деформациям либо эти деформации незначительны, можно наносить покрытия из самофлюсующихся порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 с толщинами более 0,14 мм.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, адгезия, когезия, трехточечный изгиб, самофлюсующиеся порошковые материалы.

### ASSESSMENT OF ADHESIVE-COHESIVE PROPERTIES OF PLASMA-SPRAYED NI-CR-B-SI-C COATINGS ON SAMPLES OF ALUMINUM ALLOY AK7H

*A.S. Krivorogova<sup>1,2</sup>,  
A.V. Dolmatov<sup>2</sup>,  
S.A. Ilinykh<sup>2</sup>,  
N.I. Ilinykh<sup>2</sup>,  
B.R. Gelchinsky<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> FSBI "Forensic Expert Institution of the Federal Fire Service "Testing Fire Laboratory" in the Sverdlovsk region", Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

### ABSTRACT

The results of a study of the adhesive-cohesive properties of Ni-Cr-B-Si-C coatings deposited by pre- and supersonic plasma spraying on an aluminum substrate of the AK7ch brand are presented.

It was revealed that with a three-point bend, the destruction of the sample occurs in the sprayed layer, at the point of inflection, a partial detachment of the coating from the substrate is observed. The destruction of the substrate is not observed. Deformation in the coating is caused by the action of a tensile load on the surface. For products subjected to mechanical deformations as a result of impacts, kinks, compressions, the recommended thickness of the sprayed layer is 0.13-0.14 mm. For samples that are not subjected to mechanical deformations or these deformations are insignificant, coatings of self-fluxing powder materials PGSR-2 and PGSR-4 with thicknesses of more than 0.14 mm

**Keywords:** plasma spraying, adhesion, cohesion, three-point bending, self-fluxing powder materials.

## **Введение**

Алюминий и его сплавы широко используются в различных областях техники благодаря сочетанию ряда физических, химических и механических свойств [1-3]. Применение алюминиевых сплавов в автомобилестроении, машиностроении, текстильной промышленности, авиационной, пожарной и сельскохозяйственной технике обусловлено высокой механической прочностью и высокой коррозионной стойкостью, однако главным недостатком этих материалов является их невысокая износостойкость. Большинство машин и агрегатов имеющих в своем составе детали из алюминиевых сплавов (85 - 90%) утрачивают работоспособность не из-за поломок, а вследствие изнашивания рабочих поверхностей [4]. Поэтому актуальной проблемой является поиск способов, позволяющих повысить износостойкость алюминиевых сплавов.

Из существующих методов поверхностного упрочнения в настоящее время наиболее широкое применение получили методы газотермического напыления, металлизации, вакуумного осаждения, наплавки, микродугового оксидирования и др. [5-8]. Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой используют метод сверхзвукового плазменного напыления [9 - 10].

Среди большого многообразия порошковых материалов, применяемых для нанесения газотермических покрытий, используются самофлюсующиеся сплавы [10-14]. Наиболее распространенными материалами, применяемыми для поверхностного упрочнения деталей, напыления и наплавки коррозионностойких покрытий, а также покрытий, устойчивых к изнашиванию трением и абразивными частицами, являются самофлюсующиеся сплавы системы Ni-Cr-B-Si-C [10-14].

Целью настоящей работы является исследование адгезионно-когезионных свойств покрытий на основе самофлюсующихся сплавов Ni-Cr-B-Si-C, нанесенных методами до- и сверхзвукового плазменного напыления на подложки из алюминиевого сплава АК7ч.

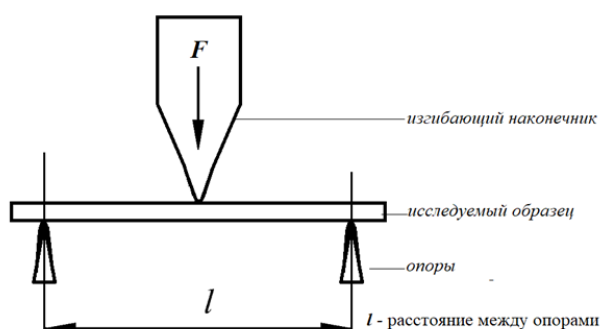
## **Испытания на трехточечный изгиб**

Важным критерием прочности и работоспособности покрытий в реальных условиях является исследование поведения системы «покрытие-подложка» при воздействии внешних деформирующих факторов. Наличие резко выраженной границы между покрытием и основой является основным фактором, который и определяет поведение этой системы при механическом нагружении. Кроме этого, существенное влияние имеет и неоднородность структуры напыленного покрытия.

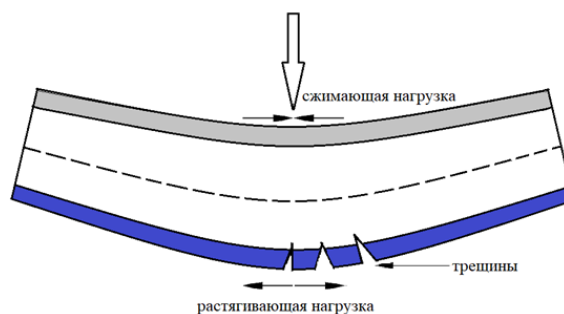
При плазменном напылении покрытие формируется послойно, частицы материала последовательно укладываются друг на друга, деформируясь и растекаясь при этом. Из-за

неоднородности порошкового сплава частицы покрытия и подложки взаимодействуют между собой не так, как если бы материал был однородным. Поэтому возникают межзеренные и межфазные границы в самом покрытии, в подложке и на границе между покрытием и подложкой. Вследствие того, что охлаждение и кристаллизация частиц происходят в условиях быстрой закалки, формируются неравновесные структуры. При ударе о поверхность подложки частицы растекаются и кристаллизуются неравномерно из-за высоких скоростей напыления. При этом некоторые частицы могут отскочить от поверхности, оставив в ней полость, что приводит к образованию пустот на стыках частиц, которые могут наполняться газом. Некоторые частицы к моменту соударения с подложкой успевают остыть и кинетической энергии соударения недостаточно для их проплавления. Поэтому такие частицы остаются в покрытии в шарообразной форме. При напылении покрытий в воздушной среде происходит взаимодействие частиц порошка с плазмообразующими газами, что приводит к формированию оксидов и выгоранию некоторых частиц. Все это влияет на характер разрушения материала при механической деформации [15-16].

При нагружении по схеме трехточечного изгиба системы «покрытие-основа» деформация происходит равномерно вдоль линии соприкосновения с верхней опорой. Различие структуры и физико-химических свойств покрытия и подложки приводит к различию развития в них пластической деформации. Максимальное растягивающее напряжение будет возникать на противоположной к месту приложения нагрузки грани [16-17]. Схематичные изображения испытания на трехточечный изгиб и возникновения сжимающих и растягивающих напряжений при этих испытаниях представлены на рис. 1 и 2, соответственно.



**Рисунок 1.** Схематичное изображение испытания на трехточечный изгиб



**Рисунок 2.** Схематичное изображение возникновения сжимающих и растягивающих напряжений при испытании на трехточечный изгиб

В настоящей работе исследование закономерностей развития деформации при трёхточечном изгибе проводилось на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z050.

Образцы для испытаний изготавливались из алюминиевого сплава АК7ч в форме плоских пластин размером 50x15x1.5 мм, на которые методами дозвукового и сверхзвукового плазменного напыления наносились покрытия различной толщины из самофлюсующихся порошковых материалов Ni-0.5C-15Cr-3.2Si-2B (ПГСП-2) и Ni-1C-17Cr-4.1Si-3.6B (ПГСП-4). Расстояние между опорами составляло 20 мм, пластина укладывалась покрытием вниз, чтобы нагружение происходило со стороны подложки. Скорость перемещения подвижной траверсы составляла 4 мм/мин.

## Оценка адгезионно-когезионных свойств покрытий

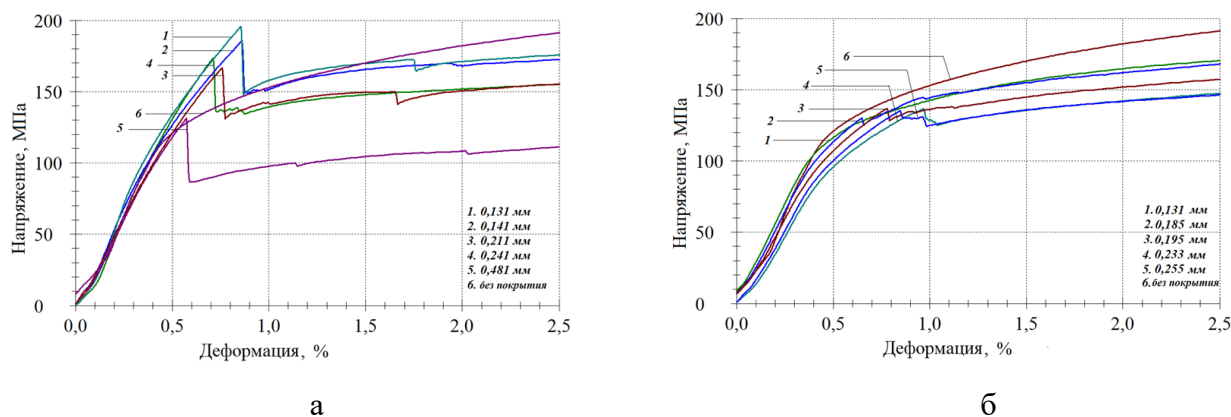
Проведено исследование прочности системы покрытие-подложка на трехточечный изгиб для образцов порошковых покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4, полученных при до- и сверхзвуковых режимах напыления. Для каждой серии испытаний подготовлено по 15 образцов с покрытиями различной толщины. Построены диаграммы нагружения, на которых выделены области соответствующие отдельным этапам деформации и разрушения образца: область упругой деформации, момент образования трещины, область развития сети трещин.

Для описания характерных закономерностей были отобраны по пять образцов с покрытиями разной толщины (табл. 1).

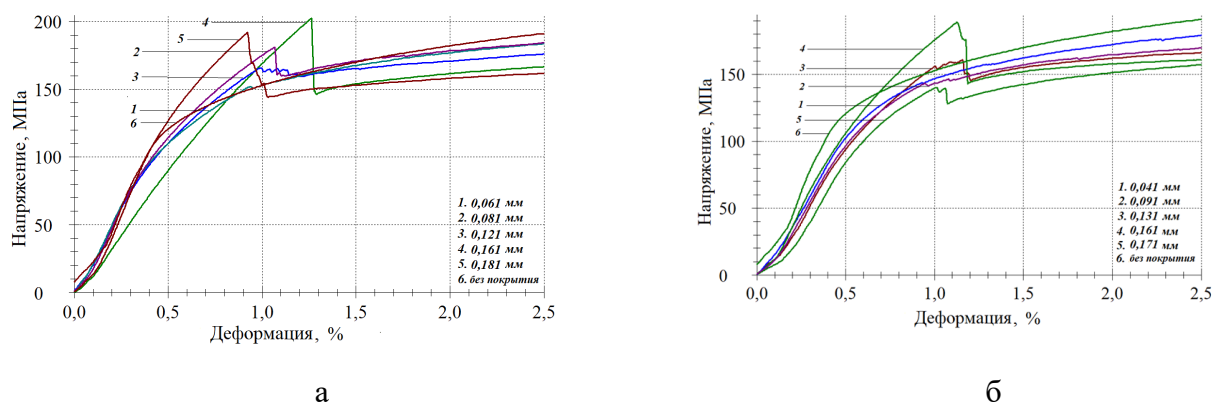
**Таблица 1.** Характеристики покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4, полученных при дозвуковом и сверхзвуковом режимах напыления

| № п/п                                        | Толщина покрытия, мм | Напряжение в момент образования первой трещины, МПа | Максимальное значение приложенной нагрузки, $F_{max}$ , МПа |
|----------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>ПГСП-2, дозвуковой режим напыления</b>    |                      |                                                     |                                                             |
| 1                                            | 0,131                | 196,68                                              | 195,68                                                      |
| 2                                            | 0,141                | 185,8                                               | 185,89                                                      |
| 3                                            | 0,211                | 166,81                                              | 173,5                                                       |
| 4                                            | 0,241                | 173,0                                               | 173,76                                                      |
| 5                                            | 0,481                | 131,0                                               | 137,04                                                      |
| <b>ПГСП-2, сверхзвуковой режим напыления</b> |                      |                                                     |                                                             |
| 1.                                           | 0,061                | 152,0                                               | 201,7                                                       |
| 2.                                           | 0,081                | 181,0                                               | 200,09                                                      |
| 3.                                           | 0,121                | 181,0                                               | 190,96                                                      |
| 4.                                           | 0,161                | 202,5                                               | 202,53                                                      |
| 5.                                           | 0,181                | 191,74                                              | 191,77                                                      |
| <b>ПГСП-4 дозвуковой режим напыления</b>     |                      |                                                     |                                                             |
| 1                                            | 0,131                | 131,0                                               | 189,26                                                      |
| 2                                            | 0,185                | 130,0                                               | 189,42                                                      |
| 3                                            | 0,195                | 136,6                                               | 177,74                                                      |
| 4                                            | 0,233                | 136,5                                               | 167,20                                                      |
| 5                                            | 0,255                | 135,0                                               | 164,86                                                      |
| <b>ПГСП-4, сверхзвуковой режим напыления</b> |                      |                                                     |                                                             |
| 1                                            | 0,041                | 143,8                                               | 204,99                                                      |
| 2                                            | 0,091                | 143,0                                               | 199,06                                                      |
| 3                                            | 0,131                | 156,0                                               | 187,60                                                      |
| 4                                            | 0,161                | 188,9                                               | 188,90                                                      |
| 5                                            | 0,171                | 140,2                                               | 180,39                                                      |

Диаграммы напряжение-деформация образцов с покрытиями ПГСП-2 и ПГСП-4 различной толщины, полученными при до- и сверхзвуковом режимах напыления, представлены на рис. 3 и 4.



**Рисунок 3.** Диаграммы напряжение-деформация серий образцов с покрытиями ПГСР-2 (а) и ПГСР-4 (б) различной толщины, полученными при дозвуковом режиме напыления



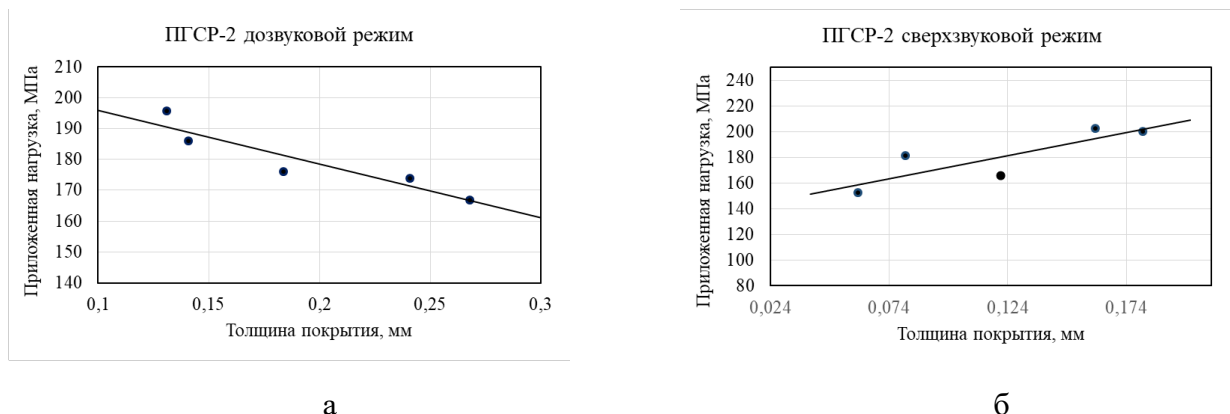
**Рисунок 4.** Диаграммы напряжение-деформация серий образцов с покрытиями ПГСР-2 (а) и ПГСР-4 (б) различной толщины, полученными при сверхзвуковом режиме напыления

Проведен анализ диаграмм напряжение-деформация для всех исследованных образцов. Показано, что разрушение образцов происходит путем адгезионно-когезионного растрескивания. При нагружении образцов с толщиной покрытия до 0,140 мм образование трещин происходит за счет когезионного растрескивания покрытия, у более толстых покрытий наблюдались адгезионные отслоения материала после когезионного разрушения покрытия.

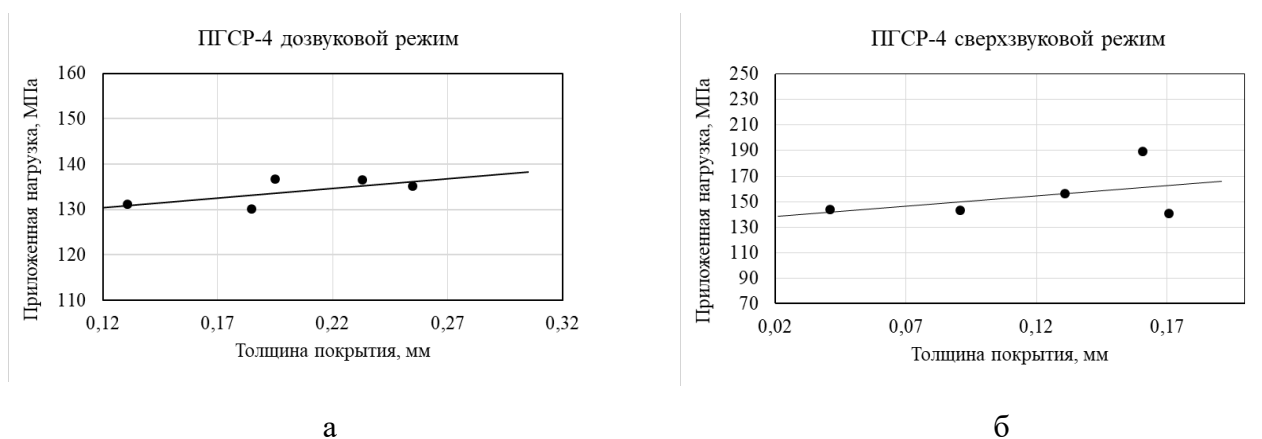
Образцы с покрытиями из самофлюсующихся порошков ПГСР-2 и ПГСР-4, нанесенными при дозвуковом и сверхзвуковом режимах напыления, в зависимости от толщины нанесенного слоя, ведут себя по-разному.

Для покрытий, полученных при дозвуковом режиме напыления, наблюдается уменьшение напряжения при увеличении толщины покрытия (рис. 5-а), а для покрытий, полученных при сверхзвуковом режиме напыления (рис. 5-б), наблюдается обратная зависимость, то есть, напряжение увеличивается с увеличением толщины.

Для образцов с покрытием из самофлюсующегося порошка ПГСР-4, нанесенным при дозвуковом режиме напыления, среднее значение напряжения, при котором начинается образование первой трещины, составляет  $F=134$  МПа (рис. 6-а).



**Рисунок 5.** Зависимость приложенной нагрузки от толщины нанесенного покрытия порошком ПГСР-2 при до- (а) и сверхзвуковом (б) режимах напыления



**Рисунок 6.** Зависимость приложенной нагрузки от толщины порошкового покрытия ПГСР-4, нанесенного при до- (а) и сверхзвуковом (б) режимах напыления

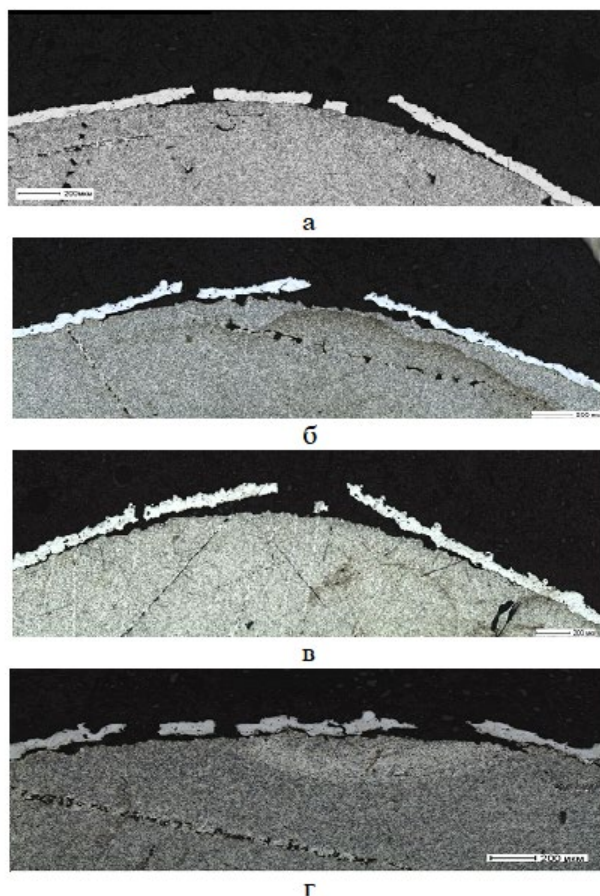
При этом, для образцов с покрытием из самофлюсующегося порошка ПГСР-4, нанесенным при сверхзвуковом режиме напыления, среднее значение напряжения составляет  $F=154$  МПа (рис. 6-б). Увеличение значения напряжения говорит о том, что прочность покрытия у образцов с покрытием ПГСР-4, полученных при сверхзвуковом режиме напыления, выше, чем у образцов, полученных при дозвуковом режиме.

На рис. 7 представлены микроструктуры деформаций образцов после испытаний на трехточечный изгиб.

Выявлено, что разрушение образца происходит в напыленном слое. Так как подложка является пластичным материалом, а покрытие хрупким, то при деформации целостность подложки не нарушается, однако покрытие растрескивается.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что разрушения подложки при трехточечном изгибе не наблюдается. Деформация в покрытии обусловлена действием растягивающей нагрузки на поверхность. Покрытие непластичное вследствие того, что состоит из многокомпонентных фаз, имеющих различную микротвердость, при этом твердость покрытия значительно превышает твердость подложки. При плазменном напылении за счет того, что температуры плавления порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 выше, чем

температура плавления алюминиевого сплава, диффузии порошка в покрытие не происходит и адгезионная связь не выдерживает высоких деформаций, поэтому в месте перегиба наблюдается частичное отслоение покрытия от основы.



**Рисунок 7.** Микроструктуры деформаций образцов с покрытиями после трехточечного изгиба:  
а – ПГСП-2, дозвуковой режим; б - ПГСП-2, сверхзвуковой режим, в- – ПГСП-4, дозвуковой режим; г - ПГСП-4, сверхзвуковой режим

### Выводы

Результаты испытаний на трехточечный изгиб показывают, что разрушение образцов происходит путем адгезионно-когезионного растрескивания.

Анализ микроструктур образцов показывает, что разрушение образца происходит в напыленном слое. Так как подложка является пластичным материалом, а покрытие хрупким, то при деформации целостность подложки не нарушается, однако покрытие растрескивается.

Для изделий, подвергающихся механическим деформациям в результате ударов, перегибов, сжатий, рекомендуемая толщина напыленного слоя составляет 0,13-0,14 мм. Для образцов, которые не подвергаются механическим деформациям либо эти деформации незначительны, можно наносить покрытия из самофлюсующихся порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 с толщинами более 0,14 мм.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Институтом металлургии Уральского отделения Российской академии наук.

### Список литературы

1. Алюминий: Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов: Пер. с англ. / Под ред. А. Т. Туманова [и др.]. - Москва: Металлургия, 1972. - 663 с.
2. Алюминий и его сплавы: Учебное пособие / Сост. А.Р. Луц, А.А. Суслина. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 81 с.
3. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов: пер. с англ./ Л. Ф. Мондольфо; под ред. Ф.И. Квасова, Г.Б.Строганова, И. Н. Фридляндера. - М.: Металлургия, 1979. - 640 с.
4. Дикусар А.И. Восстановление и упрочнение алюминиевых деталей наноконструированием поверхности с помощью ЭИЛ электродами из сплава Al-Sn / А.И.Дикусар, Е.В. Юрченко // Труды ГОСНИТИ. - 2013. -Т. 113. - С.354-363.
5. Борисов Ю.С. Плазменные порошковые покрытия / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова. - К.: Техніка, 1986. - 223 с.
6. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: учебное пособие для вузов. - 2-е изд., переработанное и доп. / А. Ф. Пузряков - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. - 357 с.
7. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. - СПб: Изд-во Политехи, ун-та, 2013. - 406 с.
8. С.А. Ильиных. Исследование физико-механических и антикоррозионных свойств плазмонапыленных покрытий на стальную подложку / С.А. Ильиных, Н.И. Ильиных, А.С. Криворогова, Е.В. Игнатьева, В.А. Крашанинин, Б.Р. Гельчинский, Л.И. Леонтьев / Материалы 15-й Международной конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 14-16 сентября 2022 года). Минск: Беларуская навука, 2022. – С. 163-167.
9. Фролов В. А. Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (обзор) / В. А. Фролов, В. А. Поклад, Д. В. Викторенков // Сварочное производство. - 2006. - № 11. - С. 38-47.
10. Кузьмин В.И. Износостойкие покрытия из никелевых сплавов, полученные с помощью сверхзвукового плазмотрона / В.И. Кузьмин, Н.А. Руденская, Н.В. Соколова, Д.В. Сергачев //Трение и износ. - 2017. - Т. 38, № 5. - С. 467-474.
11. Hemmati I. Microstructure and Phase Formation in a Rapidly Solidified Laser Deposited Ni-Cr-B-Si-C Hardfacing Alloy /I. Hemmati, V. Oceli'k //Metallurgical and materials transactions. – 2014. - №2. – P.878-892.
12. Simunovic K. Modeling and Optimization in Investigating Thermally Sprayed Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings: A Review / K. Simunovic, S. Havrlisan, T. Saric and D. Vukelic //Materials 2020, 13(20), 4584; <https://doi.org/10.3390/ma13204584>
13. Кузьмин, В.И. Плазменное напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов / В. И. Кузьмин, С. П. Ващенко, И. П. Гуляев, Е. В. Картаев, Д. В. Сергачёв [и др.] // Вестник югорского государственного университета. - 2015. - № 2 (37) - С. 45-52.
14. Зимоглядова Т.А. Особенности наплавки порошковых покрытий системы Ni-Cr-Si-B / Т.А. Зимоглядова, Е.А. Дробяз, Д.О. Муль, Д.С. Кривеженко // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016, №. 3. - С. 161-165.

15. ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу».

16. Витязь П.А. Влияние структуры и свойств покрытия и основы на поведение композиции «сталь 40Х13-малоуглеродистая сталь» в условиях деформации сжатием / П.А. Витязь, В.А. Клименов, С.В. Панин, О.Н. Нехорошков, М.А. Белоцерковецкий, Ж.Г. Ковалевская, В.А. Кукареко // Физическая мезомеханика. - 2002. - Т.5, №1. - С.337-339.

17. Панин С.В. Исследование особенностей развития деформации на мезоуровне и разрушения композиций с напыленными покрытиями при трехточечном изгибе // М.А. Белоцерковецкий, М.П. Сейфуллина, Ю.И. Почивалов, Б.Б. Овечкин // Физическая мезомеханика. - 2004. - Т. 7, № 2. - С. 91-104.

УДК 621.923

## **ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ НА РАДИАЛЬНУЮ СИЛУ РЕЗАНИЯ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ**

**С.М. Братан<sup>1</sup>,  
А.С. Часовитина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*

### **АННОТАЦИЯ**

Рассмотрено влияние относительных взаимных колебаний абразивного инструмента и заготовки на величину радиальной силы резания при внутреннем шлифовании. Предложенные аналитические зависимости, включающие в себя вибрационную составляющую, показывают, что величина силы резания на различных участках обрабатываемой поверхности изделия не является постоянной и изменяется по гармоническому закону.

**Ключевые слова:** шлифование, вибрации, съем материала, сила резания.

### **EFFECT OF RELATIVE VIBRATIONS OF THE TOOL AND THE WORKPIECE ON THE RADIAL CUTTING FORCE DURING INTERNAL GRINDING**

**S.M. Bratan<sup>1</sup>,  
A.S. Chasovitina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

### **ABSTRACT**

The influence of relative mutual vibrations of the abrasive tool and the workpiece on the radial cutting force during internal grinding is considered. The proposed analytical dependences, including the vibration component, show that the magnitude of the cutting force on various parts of the processed surface of the product is not constant and varies according to the harmonic law.

**Keywords:** grinding, vibration, material removal, cutting force.

## Введение

На сегодняшний день в промышленности реализуется множество методов обработки материалов с высокой точностью, одним из которых является шлифование [1-3].

Процесс шлифования является универсальным (возможность шлифования изделий различной конфигурации), высокопроизводительным и легко автоматизирующимся методом обработки деталей. Однако, прогнозирование выходных параметров качества является трудоемким по причине стохастического характера взаимодействия зерен абразивного материала и поверхности заготовки при удалении материала. Помимо этого, абразивные зерна имеют сложную нерегулярную геометрию и случайным образом расположены на рабочей поверхности инструмента. На шлифование, в том числе, влияют и процессы, изменяющие динамические свойства технологической системы, возникающие при соприкосновении инструмента и заготовки. Появление взаимных колебаний инструмента и заготовки, возникающих из-за вибраций станка, отклонений формы инструмента от круглости и т.д., приводит к изменению параметров упругопластического контакта с материалом абразивных зерен. При наличии вибраций сила резания не является постоянной, соответственно, изменяются глубина шлифования, величины съема материала и шероховатости поверхности. В связи с вышеизложенным, существует необходимость разработки математических моделей, адекватно описывающих процесс с учетом вибраций на выходные показатели операции шлифования [4,5].

## Изложение основного материала

Начальная фаза вибраций характеризует положение изменения текущей глубины микрорезания относительно зоны контакта. На примере  $\psi_y = 2\pi$  выполним аналитический расчет радиальной силы резания по входным технологическим переменным процесса внутреннего шлифования с учетом вибраций.

$$Y_{2\pi} = A^2 \cdot L_y + \frac{16}{15} \cdot (t_f - y)^{2.5} \cdot D_e^{0.5} + \frac{A^2 \cdot V_u \cdot \sin 2\gamma}{2 \cdot \omega} + \frac{8 \cdot A \cdot V_u^3 \cdot \sin \gamma}{D_e \cdot \omega^3} + \frac{8 \cdot A \cdot V_u^2 \cdot L_y \cdot \left( 2 \sin \left( \frac{\gamma}{2} \right)^2 - 1 \right)}{D_e \cdot \omega^2},$$

$$\text{при } \gamma = \frac{\omega \cdot (t_f - y)^{0.5} \cdot D_e^{0.5}}{V_u}, \quad L_y = (t_f - y)^{0.5} \cdot D_e^{0.5},$$

где  $Y_{\psi_y}$  - параметр, характеризующий влияние относительных колебаний заготовки и инструмента на вероятность удаления материала;  $A$  - амплитуда, м;  $\omega$  - циклическая частота, рад/с;  $D_e$  - эквивалентный диаметр, м;  $V_u$  - скорости заготовки, м/с;  $L_y$  - длина зоны контакта, м;  $t_f$  - глубина микрорезания, м;  $y$  - рассматриваемый уровень, м.

С учетом амплитуды относительных колебательных движений шлифовального инструмента и заготовки величина радиального съема материала может быть вычислена по формуле [6,7]:

$$\Delta r_\omega = \frac{t_f^2}{\frac{7\pi}{15} t_f + \frac{13\pi}{3} \cdot \frac{V_u}{K_c \cdot (V_k + V_u) \cdot n_g \cdot \sqrt{D_g \cdot \rho_g}} + \Psi^{0.4}}, \quad (1)$$

где  $n_g$  - количество зерен в единице площади, зерен/мм<sup>2</sup>;  $K_c$  - коэффициент стружкообразования;  $\rho_g$  - радиус округления вершин зерен, м;  $V_k$  - скорость инструмента, м/с;  $\Psi$  - вибрационная составляющая, учитывающая состояние технологической системы в период первого касания инструмента с поверхностью заготовки.

В зависимости от начальной фазы отклонений переменная  $\Psi$  определяется:

при  $\psi_y = 0(2\pi)$  и  $\psi_y = \pi$ :

$$\Psi = \frac{15}{16} A^2 \cdot \sqrt{t_f} + \frac{15 \cdot A^2 \cdot V_u \cdot \sin 2\gamma}{32 \cdot \omega \cdot D_e^{0.5}} + \frac{15 \cdot A \cdot V_u^3 \cdot \sin(\gamma)}{2 \cdot D_e^{1.5} \cdot \omega^3} + \frac{15 \cdot A \cdot V_u^2 \cdot \sqrt{t_f} \cdot \left( 2 \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)^2 - 1 \right)}{2 \cdot D_e \cdot \omega^2}; \quad (2)$$

или

$$\Psi = \frac{15}{16} A^2 \cdot \sqrt{t_f} + \frac{15 \cdot A^2 \cdot V_u \cdot \sin 2\gamma}{32 \cdot \omega \cdot D_e^{0.5}} + \frac{15 \cdot A \cdot V_u^3 \cdot \sin(\gamma)}{2 \cdot D_e^{1.5} \cdot \omega^3} + \frac{15 \cdot A \cdot V_u^2 \cdot \sqrt{t_f} \cdot \sqrt{(1 - \sin^2(\gamma))}}{2 \cdot D_e \cdot \omega^2} \quad (3)$$

при  $\psi_y = \frac{\pi}{2}$  и  $\psi_y = \frac{3\pi}{2}$ :

$$\Psi = \frac{15}{16} A^2 \cdot \sqrt{t_f} - \frac{15 \cdot A^2 \cdot V_u \cdot \sin 2\gamma}{32 \cdot \omega \cdot D_e^{0.5}}; \quad (4)$$

С учетом выражения (1) определим величину слоя, в котором распределена шероховатость. Для этого будет использована зависимость:

$$H = t_f - \frac{t_f^2}{\frac{7\pi}{15} t_f + \frac{13\pi}{3} \cdot \frac{V_u}{K_c \cdot (V_k + V_u) \cdot n_g \cdot \sqrt{D_s \cdot \rho_g}} + \Psi^{0.4}}.$$

Величина силы резания может быть рассчитана по формуле (5):

$$P_y = 3\sqrt{2} L_k \cdot n_s \sqrt{\rho_s \cdot h_{g\max} \cdot H \cdot D_s} \cdot \left( 0,055 H \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,061 \sqrt{\rho_g \cdot h_{g\max}} \right) \cdot \tau_s, \quad (5)$$

где  $L_k$  – высота шлифовального круга, м;  $h_{g\max}$  – износ зерна, м;  $\beta$  и  $\beta_1$  – углы резания абразивного материала;  $\tau_s$  – напряжение сдвига, Н/м<sup>2</sup>.

Напряжение сдвига вычисляется по формуле:

$$\tau_s = \frac{\sigma}{1,5}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  – предел прочности материала.

### Результаты и их обсуждение

Гармонический закон формирования неравномерного съема материала с обрабатываемой поверхности обусловлен величиной силы резания, изменяющейся при возникновении взаимных колебаний.

Для наглядной демонстрации этого явления выполним расчет съема материала при шлифовании отверстий диаметром 150 мм в заготовках из титанового сплава BT3-1 инструментом AW60×25×13 63CF90M7BA35 м/с (при скорости круга –  $V_k =$

$V_u = 0,25$  м/с, продольной подаче – 33 мм/с, поперечной подаче –  $S_y = 0,005$  мм/ход). Пусть для заданных условий обработки глубина микрорезания составляет  $t_f = 11,54 \cdot 10^{-6}$  м, коэффициент стружкообразования  $k_c = 0,9$ ;  $\rho_g = 7,31 \cdot 10^{-6}$  мм;  $n_g = 15,86$  зерен/мм<sup>2</sup>. Для рассмотренных условий  $\omega = 628$  рад/с. Расчет выполним при амплитуде  $A = 0,2 \cdot t_f$  м.

Параметр  $\Psi$  и величины  $\Delta r_{\omega}$ ,  $H$ ,  $P_y$  для случаев, когда начальная фаза равна:  $\psi_y = 2\pi$  и  $\psi_y = \pi$  (6), (7);  $\psi_y = \frac{\pi}{2}$  и  $\psi_y = \frac{3\pi}{2}$  (8) будут рассчитаны:

при  $\psi_y = 2\pi$  и  $\psi_y = \pi$ :

$$\Psi = \frac{15}{16} (0,2 \cdot 11,54 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \sqrt{11,54 \cdot 10^{-6}} + \frac{15 \cdot (0,2 \cdot 11,54 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,25 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot 628 \cdot \sqrt{11,54 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,1^{0.5}}{0,25}\right)}{32 \cdot 628 \cdot 0,1^{0.5}} +$$

$$+ \frac{15 \cdot 0,2 \cdot 11,54 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25^3 \cdot \sin\left(\frac{628 \cdot \sqrt{11,54 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,1^{0.5}}{0,25}\right)}{2 \cdot 0,1^{1.5} \cdot 628^3} +$$

$$+ \frac{15 \cdot 0,2 \cdot 11,54 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25^2 \cdot \sqrt{11,54 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(2 \sin\left(\frac{628 \cdot \sqrt{11,54 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,1^{0.5}}{2 \cdot 0,25}\right)^2 - 1\right)}{2 \cdot 0,1 \cdot 628^2} = 1,134 \cdot 10^{-13},$$

$$\Delta r_{\omega(i-1)} = \frac{(11,54 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} \cdot 11,54 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \cdot \frac{0,25}{0,9 \cdot (35 + 0,25) \cdot 15,866 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} + (17,79 \cdot 10^{-14})^{0.4}}} =$$

$$= 4,232 \cdot 10^{-6} \text{ (м);}$$

$$H = t_f - \Delta r_{\omega(i-1)} = 11,54 \cdot 10^{-6} - 4,232 \cdot 10^{-6} = 7,308 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$P_y = 3\sqrt{2} \cdot L_k \cdot n_3 \cdot \sqrt{\rho_g \cdot h_{g\max}} \cdot H \cdot D_e \cdot \left(0,055 \cdot H \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,061 \cdot \sqrt{\rho_g \cdot h_{g\max}}\right) \cdot \tau_s =$$

$$= 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \cdot 7,308 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot$$

$$\cdot \left(0,055 \cdot 7,308 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \cdot \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}\right) \cdot 13,33 \cdot 10^8 = 12,966[H].$$

при  $\psi_y = \frac{\pi}{2}$  и  $\psi_y = \frac{3\pi}{2}$ :

$$\Psi = \frac{15}{16} (0,2 \cdot 11,54 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \sqrt{11,54 \cdot 10^{-6}} -$$

$$- \frac{15 \cdot (0,2 \cdot 11,54 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,25 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot 628 \cdot \sqrt{11,54 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,1^{0.5}}{0,25}\right)}{32 \cdot 628 \cdot 0,1^{0.5}} = 1,939 \cdot 10^{-14},$$

$$\Delta r_{\omega(i-1)} = \frac{(11,54 \cdot 10^{-6})^2}{\frac{7\pi}{15} \cdot 11,54 \cdot 10^{-6} + \frac{13\pi}{3} \cdot \frac{0,25}{0,9 \cdot (35 + 0,25) \cdot 15,866 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} + (1,883 \cdot 10^{-14})^{0,4}}} =$$

$$= 4,739 \cdot 10^{-6} \text{ (м);}$$

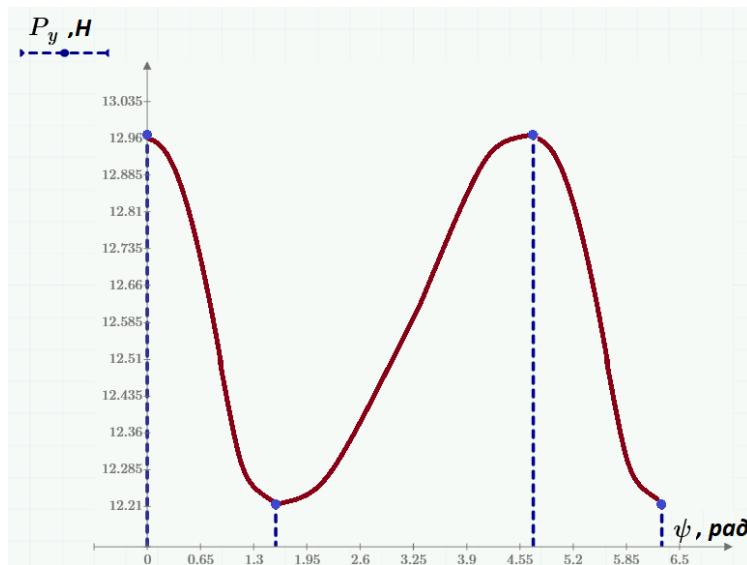
$$H = t_f - \Delta r_{\omega(i-1)} = 11,54 \cdot 10^{-6} - 4,739 \cdot 10^{-6} = 6,801 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$P_y = 3\sqrt{2} \cdot L_k \cdot n_3 \cdot \sqrt{\rho_g \cdot h_{g \max} \cdot H \cdot D_e} \cdot \left( 0,055 \cdot H \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,061 \cdot \sqrt{\rho_g \cdot h_{g \max}} \right) \cdot \tau_s =$$

$$= 3\sqrt{2} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 15,866 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 6,108 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1} \cdot$$

$$\cdot \left( 0,055 \cdot 6,108 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,3746}{0,5591} + 0,061 \cdot \sqrt{7,31 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot 13,33 \cdot 10^8 = 12,213 [H].$$

На рисунке 1 представлен график изменения силы резания  $P_y$  в зависимости от уровня относительных вибраций для различных начальных фаз при шлифовании отверстий в изделиях из титанового сплава BT3-1.



**Рисунок 1.** Влияние начальной фазы относительных вибраций, без учета влияния износа инструмента на величину силы резания при шлифовании отверстий инструментом AW 60×25×13 63C F90 M 7 В А 35 м/с в заготовках из титана BT3-1 при  $t_f = 11,54$  мкм, циклической частоте  $\omega = 628$  рад/с, скорости круга –  $V_k = 35$  м/с, скорости заготовки –  $V_u = 0,25$  м/с, продольной подаче – 33 мм/с, поперечной подаче –  $S_y = 0,05$  мкм/ход на  $i$ -ом проходе

## Заключение

Полученные зависимости отражают влияние относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки на съем материала, слой, в котором распределена шероховатость и силу резания. При наличии вибраций закон сила резания не является величиной постоянной и изменяется по гармонической кривой, как и съем материала. Из расчетов можно проследить влияние начальной фазы исследуемые параметры системы. Например, при начальных фазах, равных  $\psi_y = \frac{\pi}{2}$  и  $\psi_y = \frac{3\pi}{2}$ , наблюдается увеличение величины силы резания, и, соответственно, объема снимаемого материала, чем при  $\psi_y = 2\pi$  и  $\psi_y = \pi$ .

Полученные выражения позволяют определить параметры системы для различных схем шлифования, принимая во внимания величину относительных вибраций и начальной фазы. Однако, необходимо учитывать, что параметры технологической системы являются динамическими, в следствие износа шлифовального круга.

## Список литературы

1. Суслов А. Г. Исследование поверхностей с различной механической обработкой на уровне субшероховатости / А. Г. Суслов, М. Г. Шалыгин, С. В. Кузнецов // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 9(51). – С. 45-47.
2. Бубнов В.А. Титан и его сплавы в машиностроении / В.А Бубнов, А.Н. Князев // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 3 (42). – С. 92-96.
3. Носенко В. А., Федотов Е. В., Даниленко М. В. Математическое моделирование распределения вершин зерен при шлифовании в результате различных видов изнашивания с использованием марковских случайных процессов // МНИЖ. 2015. №2-1 (33).
4. Novoselov, Y. Patterns of Removing Material in Workpiece - Grinding Wheel Contact Area / Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // Procedia Engineering : International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 мая 2017 года. – Saint-Petersburg: Elsevier Ltd, 2017. – P. 991-996. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.583.
5. Братан С.М. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании / С. М. Братан, С. И. Рошупкин, А. С. Часовитина, К. Гупта // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 33-47. – DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.
6. Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes, 2021, Materials Science Forum, 1037 MSF, pp. 384-389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384
7. Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding. *Materials Today: Proceedings*, Volume 38, Part 4, 2021, pp. 2088-2091, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.

УДК 621.9.08

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ВАЛА МЕТОДОМ ТРЕХ ПУСКОВ

*Р. М. Джемалядинов<sup>1</sup>,  
Э. В. Валиев<sup>1</sup>,  
С. К. Ибрагимов<sup>1</sup>,  
М. Р. Абкеримов<sup>1</sup>,*

*<sup>1</sup>Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь, Россия*

### АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается способ балансировки вала методом трех пусков, основанный на комбинации динамической балансировки валов на месте, без фазовых перемещений. Представленный метод заключается в навешивании пробных грузов на деталь и расчета по формулам необходимого угла дисбаланса, на который устанавливается уравнивающий груз.

**Ключевые слова:** балансировка, метод трех пусков агрегатные станки, угол дисбаланса.

## IMPROVEMENT OF DYNAMIC SHAFT BALANCE BY THE THREE-START METHOD

*R. M. Dzhemalyadinov<sup>1</sup>,  
E. V. Valiev<sup>1</sup>,  
S. K. Ibragimov<sup>1</sup>,  
M. R. Abkerimov<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russia*

### ABSTRACT

The article discusses the method of shaft balancing by the method of three starts, based on a combination of dynamic shaft balancing in place, without phase displacements. The presented method consists in hanging test weights on the part and calculating the required unbalance angle by formulas, on which the balancing weight is set.

**Keywords:** balancing, method of three starts aggregate machines, unbalance angle.

### Введение

Машиностроение в современном мире является важнейшей отраслью хозяйственной деятельности, определяющей степень и прогресс развития разных отраслей промышленности: металлургии, энергетики, сельского хозяйства, оборонной промышленности и многих других.

Современное производство в машиностроении характеризуется многономенклатурностью изделий и нестабильными объемами изготовления продукции, поэтому необходимо для сохранения конкурентоспособности предприятия максимально

снижать себестоимость изготовления продукции и экономить время на контроле продукции. Внедрение нового, усовершенствованного метода балансировки должно быть рациональным, а следовательно, усовершенствование метода балансировки представляет собой актуальную научную и практическую задачи [2, 3, 4, 5, 6].

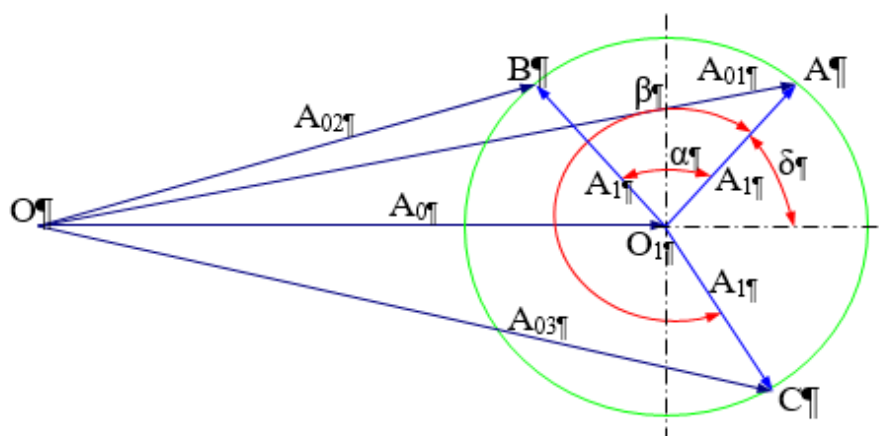
Применение новейших станков, использующих числовое программное управление (ЧПУ) вместо универсальных станков, имеют значительные преимущества и создают определенные особенности в использовании [1]:

- станок повышает в производительность в 1,5 - 5 раз, если сравнивать с аналогичными станками, имеющими непосредственно ручное управление;
- сочетают в себе гибкость, точность и производительность, что и приводит к возможности решения вопроса комплексной автоматизации, а именно серийного и единичного процесса производства;
- качественное вооружение предприятий новейшей вычислительной техникой;
- подготовка производства переадресовывается на инженерный труд и снижается необходимость в квалифицированных рабочих;
- сокращается рабочее время, для пригоночных работ, затрачиваемого на процесс сборки, исходя из того, что детали, изготовленные по одной и той же программе, взаимозаменяемы;
- снижается протяженность цикла изготовления деталей и значительно уменьшается необходимый запас незавершенной работы;

Исходя из этого, исследование технологического процесса детали «Вал промежуточный» очень актуально.

Целью статьи является усовершенствование технологического процесса изготовления промежуточного вала путем повышения эффективности операции балансировки.

**Основная часть.** Балансировка вала методом трех пусков основан на комбинации динамической балансировки валов на месте, без фазовых перемещений. Он выполняется с помощью навешивания пробных грузов на деталь и расчета по формулам необходимого угла дисбаланса, на который будет установлен уравнивающий груз.



**Рисунок 1.** Схема балансировки методом трех пусков.

Здесь  $O_1A$ ,  $O_1B$ ,  $O_1C$  – амплитуды вибраций подшипника, согласно установленной массе пробного груза  $P$ ;

$\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  – углы установки пробного груза и угол дисбаланса соответственно.

Из рисунка 1, опираясь на свойства косоугольных треугольников, строим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A_{01}^2 &= A_0^2 - A_1^2 + 2 \cdot (A_0 + A_1) \cdot \cos \delta \\ A_{02}^2 &= A_0^2 - A_1^2 + 2 \cdot (A_0 + A_1) \cdot \cos(\delta + \alpha) \\ A_{03}^2 &= A_0^2 - A_1^2 + 2 \cdot (A_0 + A_1) \cdot \cos(\delta + \beta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где,  $\alpha, \beta$  – углы установки пробного груза;  $\delta$  – угол дисбаланса;  $A_0$  – расстояние от опоры до центра плоскости сечения;  $A_1$  – амплитуда вибрации подшипника.

Определяем  $A_1$  из системы уравнений:

$$A_1 = \frac{A_{01}^2 + A_{02}^2}{A_0 \cdot (\cos \delta + \cos(\delta + \alpha))}. \quad (2)$$

Определяем  $\tan \delta$  из системы уравнений:

$$\tan \delta = \frac{(A_{01}^2 + A_{03}^2) \cdot (1 + \cos \alpha) + (A_{01}^2 + A_{02}^2) \cdot (1 + \cos \beta)}{((A_{01}^2 + A_{02}^2) \cdot \sin \alpha - (A_{01}^2 + A_{03}^2) \cdot \sin \beta) \cdot \sin \alpha}. \quad (3)$$

После этого определяем массу балансирующего груза из формулы:

$$Q_6 = P \cdot \frac{A_0}{A_1}, \quad (4)$$

где масса пробного груза определяется из формулы:

$$P \leq 0,2 \frac{m_{pA} \cdot g}{\omega^2 \cdot r}; \quad (5)$$

где,  $m_{pA}$  – масса ротора, приходящаяся на подшипник А, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\omega$  – угловая скорость,  $\omega = \pi \cdot n / 30$ , рад;  $r$  – радиус установки пробного груза, м.

Уравновешивающий груз устанавливается под углом от места первой установки пробного груза.

Пример балансировки вала методом трех пусков, используя типичную деталь «Вал промежуточный».

Для удобства расчета по результатам измерений размещаем данные измерений (по значению вибрации) от большего к меньшему  $A_{01} > A_{02} > A_{03}$ .

Рассчитаем массу пробного груза по формуле 5:

$$P \leq 0,2 \frac{1,2 \cdot 9,81}{104,7^2 \cdot 0,15} = 0,0014 \text{ (кг)},$$

$$\omega = 3,14 \frac{1000}{30} = 104,7 \text{ (рад)}.$$

Пробный груз должен быть не более 1,4 г. Принимаем массу пробного груза 1,2 г.

По результатам измерений вибрации при балансировке вала определяем угол дисбаланса для вертикального перемещения при 800 об/мин по формуле 3:

$$\tan \delta_{1B} = \frac{(9^2 + 3^2) \cdot (1 + \cos 120^\circ) + (9^2 + 15,2^2) \cdot (1 + \cos 240^\circ)}{((9^2 + 15,2^2) \cdot \sin 120^\circ - (9^2 + 3^2) \cdot \sin 240^\circ) \cdot \sin 120^\circ} = 4,677,$$

$$\delta_{1B} = 78^\circ.$$

По аналогии рассчитываем  $\delta$  (угол дисбаланса) для других показателей.

По формуле 2 рассчитываем значение  $A_1$  для нахождения массы балансирующего веса по формуле 4:

$$A_1 = \frac{15,2^2 + 9^2}{14,6 \cdot (\cos(-78^\circ) + \cos(-78^\circ + 120^\circ))} = 9,58 \text{ (мкм)},$$

$$Q_6 = 0,0012 \cdot \frac{14,6}{9,58} = 0,0018 \text{ (кг)}.$$

По аналогии рассчитываем  $A_1$  и массу балансирующего веса.

Устанавливаем балансирующий груз на угол  $79^\circ$  от начального угла балансирующего груза и выбираем массу балансирующего груза 1,8 г.

**Заключение.** Путем комбинирования существующих способов, разработан усовершенствованный метод балансировки, способствующий снижению времени и повышению производительности процесса балансировки.

### Список литературы

1. Кузнецов, Ю. И. Оснастка для станков с ЧПУ [Текст]: Ю. И. Кузнецов, А. Р. Маслов, А. Н. Байков – М : Машиностроение, 1990. – 512 с.
2. Инструкция 544.7000.000 И1 «Динамическая балансировка ротора» [Текст]: Сумы, 2010. – 24 с.
3. Основы балансировки роторов [Текст]: Москва, 2018. – 54 с.
4. ГОСТ 19534: Балансировка вращающихся тел. Термины [Текст]: Москва, 1974. – 48 с.
5. ГОСТ ISO 21940-31-2016 Вибрация. Балансировка роторов. Часть 31. Подверженность и чувствительность машин к дисбалансу [Текст]: 2017. – 52 с.
6. ГОСТ ИСО 1940-1-2007 Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса [Текст]: 2007. – 48 с.

УДК 621.771.013

### АНАЛИЗ СХЕМ И МЕТОДОВ ЗАТЫЛОВАНИЯ ЗУБЬЕВ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ МЕТЧИКОВ

*А.О. Харченко<sup>1</sup>,  
С.В. Корчевский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

### АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматриваются существующие формы поперечных сечений метчиков, а также схемы формообразующих движений в станках для затылования зубьев рабочей части мелкоразмерных метчиков. Анализ производственного опыта по изготовлению метчиков показывает, что при затыловании их рабочей части применяется радиальное перемещение затылующего инструмента – шлифовального круга, что приводит к искажению резьбового профиля на рабочих выступях метчика и снижает точность и качество получаемой ими резьбы.

Рассмотрены особенности протекания процесса затылования метчиков по известным схемам перемещения затылующего инструмента и предложен способ получения затылованных зубьев на метчиках путем пересечения многозаходных резьб с витками его основной резьбы, отличающийся минимальными затратами на оснастку и исключающий искажение профиля резьбы на рабочих выступах.

**Ключевые слова:** затылование, метчик, зубья рабочей части, резьба, формообразующие движения, затыловочный станок, искажение профиля, точность резьбы.

## **ANALYSIS OF SCHEMES AND METHODS FOR BACKING TEETH OF THE WORKING PART OF SMALL-SIZED TAPS**

*A.O. Kharchenko<sup>1</sup>,  
S.V. Korchevski<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*FSFAEI HE «Sevastopol state university», Sevastopol, Russia*

### **ABSTRACT**

In this article it is being considered existing taps cross section forms and also schemes of forming moves in machines for low dimension taps working teeth backing. Taps handling industrial experience analysis presents, that during backing their working part backing tool's radial moving is applied – grinding wheel, which leads to thread profile distortion on working taps ledges and decreases precision and quality of thread gained by their. Taps backing process features on known backing tool moves schemes have been considered and method has been proposed for obtaining backed teeth on taps by intersecting multi-pass threads with the turns of its main thread, characterized by minimal tooling costs and eliminating thread profile distortion on the working ledges.

**Keywords:** backing, tap, teeth's working part, thread, forming moves, backing machine, profile distortion, thread precision.

Многолезвийные инструменты, такие как фрезы, развертки, метчики по форме зубьев могут быть острозаточенными (остроконечными) или затылованными [1-4]. Несмотря на простоту изготовления первых из них, для получения высокоточных фасонных поверхностей применяют только инструменты с затылованными зубьями, при переточке которых по передним поверхностям профиль зубьев и величина задних углов во всех точках режущих кромок не изменяется или изменяется в незначительных пределах.

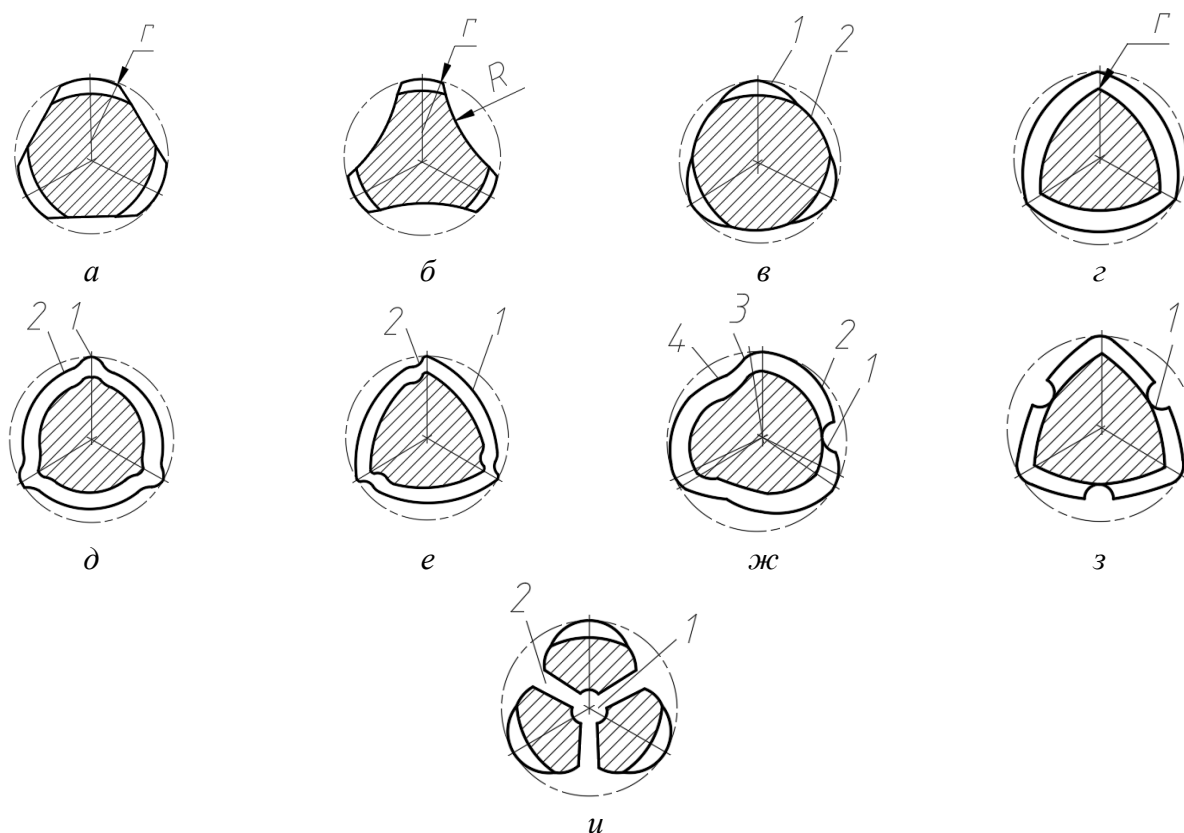
Различают в зависимости от направления движения затылующего инструмента радиальное (метчики, дисковые и червячные модульные фрезы), косое (фасонные фрезы), торцовое (осевое), когда затылующее движение совершается параллельно оси центров станка.

Метчики, широко используемые в машиностроении для образования резьбы в отверстиях, разнообразны по конструкциям и геометрическим параметрам [2, 3, 5, 6].

Достоинствами метчиков являются: простота формообразующих движений; возможность нарезания резьбы за счет самоподачи; достаточная точность резьбы, определяемая точностью изготовления метчиков. По конструкции режущие метчики делят на следующие типы: ручные и машинно-ручные. Для получения внутренних резьб в пластичных материалах вместо резания используют метод пластического деформирования, при котором резьба образуется путем выдавливания в обрабатываемом материале.

Наиболее важным элементом резьбового метчика является рабочая (заборная и калибрующая) часть, которая характеризуется конфигурацией поперечного сечения и формой

затылуемых зубьев. Формы поперечных сечений рабочей части пластически деформирующих метчиков представлены на рис. 1 [1, 6, 7].



**Рисунок 1.** Формы поперечных сечений пластически деформирующих метчиков

Современные метчики представляют собой тела вращения с различной конфигурацией поперечного сечения, которая формируется с помощью затылования, схема и метод осуществления которого существенно влияют на качество внутренней резьбообработки мелкогабаритными метчиками. На современном этапе развития машиностроения вопрос обеспечения требуемых показателей точности и качества процесса затылования метчиков является весьма актуальным.

Например, имеется конструкция метчика, у которого для облегчения процесса пластического деформирования металла на поверхности удлиненного заборного конуса сделаны плоские лыски со скругленными по резьбе краями (рисунок 1, а). В отличие от описанного выше, метчик (рисунок 1, б) имеет сечение  $n$ -угольника со срезанными по окружности вершинами и вогнутыми сторонами, образованными радиусом  $R$  и радиусом сопряжения  $r$  вогнутой поверхности с наружной, равными:

$$R = (0,2...0,4)d_0;$$

$$r = (0,001...1)P,$$

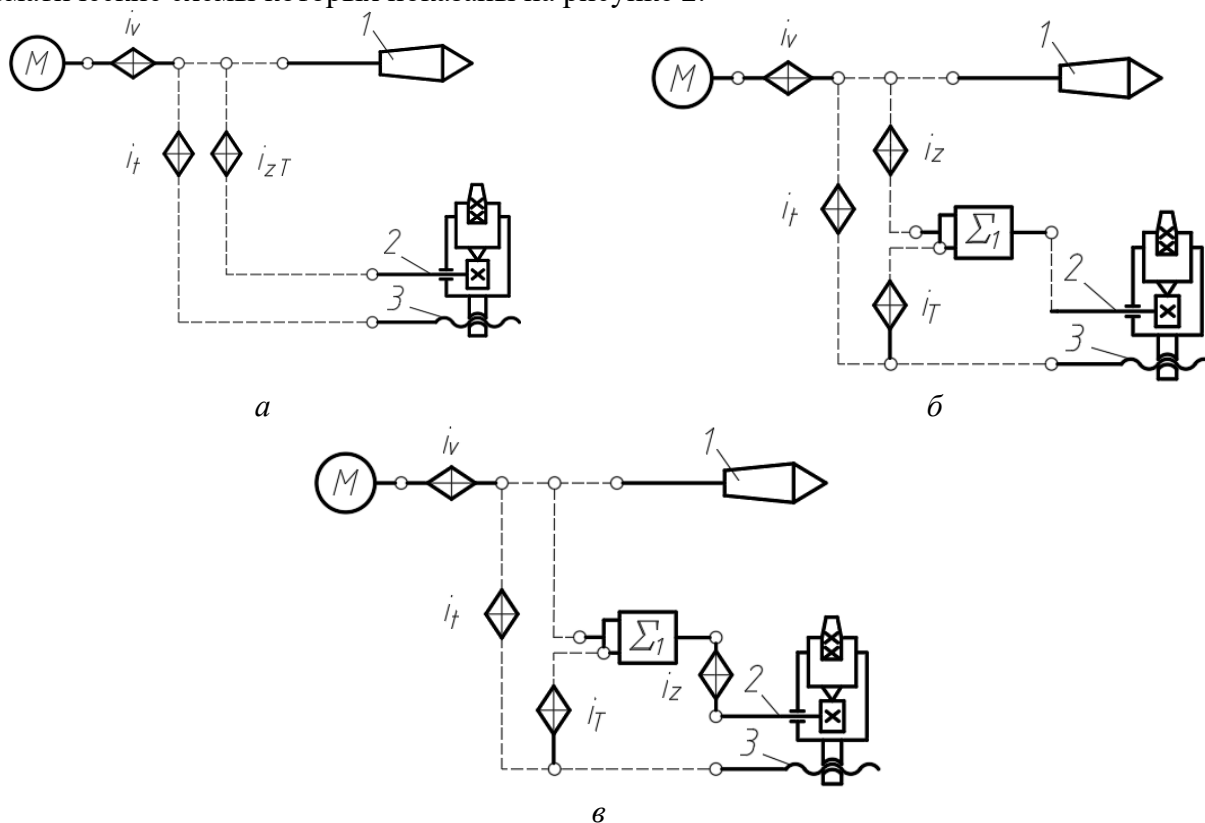
где  $d_0$  – диаметр отверстия под резьбу, мм;  $P$  – шаг резьбы, мм.

Метчик (рисунок 1, в) представляет собой равносторонний оваловый треугольник, стороны которого выполнены в виде дуг большого радиуса и имеет три точки 1 с полным профилем резьбы, которые лежат на ее номинальном наружном диаметре, а также три

промежуточные точки 2 – на внутреннем. Конструкция (рисунок 1, *з*) имеет полный профиль резьбы по всему периметру. Существует также сечение (рисунок 1, *д*), имеющее выступающие участки 1, образованные кривой от эксцентрикового кулачка и дуги окружности 2. Сечение (рисунок 1, *е*) имеет участки 1 в виде архимедовой спирали и участки 2 радиусной формы. Сечение в виде неправильного многоугольника (рисунок 1, *ж*) содержит рабочую часть 2, калибрующую 3 и затылованную 4. Неглубокая канавка 1 служит для поступления смазки и выхода лишнего воздуха при обработке резьбы в глухих отверстиях. Рабочая часть имеет более плавный и меньший наклон, чем наклон затылованного участка. Вариант сечения с тремя смазочными канавками представлен на рисунке 1, *з*. В Японии (патент кл. 12С, 142.1 №1748) разработана и используется конструкция метчика (рисунок 1, *и*), вдоль оси которого выполнен внутренний смазочный канал с ответвляющимися отверстиями.

Рассмотренные виды существующих поперечных сечений метчиков получены радиальными движениями для придания необходимой конфигурации зубьям и реализуются на специализированном затыловочном оборудовании [2] или резьбошлифовальных станках [1, 3, 6, 7].

При радиальном способе затылования применяют универсальные затыловочные станки, кинематические схемы которых показаны на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Кинематические схемы универсальных затыловочных станков

В универсальных затыловочных станках осуществляются следующие основные движения: вращение с определенной скоростью шпинделя станка с затылуемым изделием; перемещения режущего инструмента для снятия затылков зубьев; продольное движение каретки от ходового винта, обеспечивающее перемещение режущего инструмента по винтовой линии нарезки изделия; перемещение, дающее дополнительное число затыловочных движений

суппорта, необходимое для затылования изделий со спиральными стружечными канавками. Согласованность этих движений достигается настройкой соответствующих кинематических цепей [2].

Настройка цепей производится по следующим формулам. Частота вращения шпинделя:

$$n = \frac{1000v_z}{\pi D},$$

где  $v_z$  – скорость резания, м/мин;  $D$  – диаметр затылуемого изделия, мм.

Формула для подбора сменных зубчатых колес гитары:

$$i_t = \frac{t}{K_t t_{x.6}} = \frac{a_1 c_1}{b_1 d_1},$$

где  $i_t$  – передаточное отношение гитары шага винтовой линии нарезки;  $t$  – шаг винтовой линии нарезки, мм;  $K_t$  – передаточное отношение постоянных зубчатых передач от шпинделя на ходовой винт;  $t_{x.6}$  – шаг резьбы ходового винта, мм;  $a_1, b_1, c_1, d_1$  – числа зубьев сменных колес гитары.

В настройке остальных кинематических цепей станков без дифференциала (рисунок 2, а) и с дифференциалом (рисунок 2, б, в) имеются различия.

Уравнение кинематической цепи затылования для станков с дифференциалом:

$$1 \text{ об. шп. } K_z i_z = z,$$

откуда вытекает расчетная формула:

$$i_z = \frac{z}{K_z} = \frac{a_2 c_2}{b_2 d_2},$$

где  $K_z$  – передаточное отношение постоянных зубчатых передач в цепи затылования.

Затылование метчиков, в частности, мелкогабаритных (для резьб М2...М6), осуществляется на резьбошлифовальных станках. В конструкциях данных станков присутствуют механизмы, обеспечивающие поперечное перемещение шлифовального круга: шарнирные, ползунные, рычажные, пружинные (рисунок 3).

Вследствие различий в схемах движений при затыловании геометрия поперечного сечения метчиков, несмотря на одинаковую величину затылования, обеспечиваемую одним и тем же кулачком 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.

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 происходит его искажение.

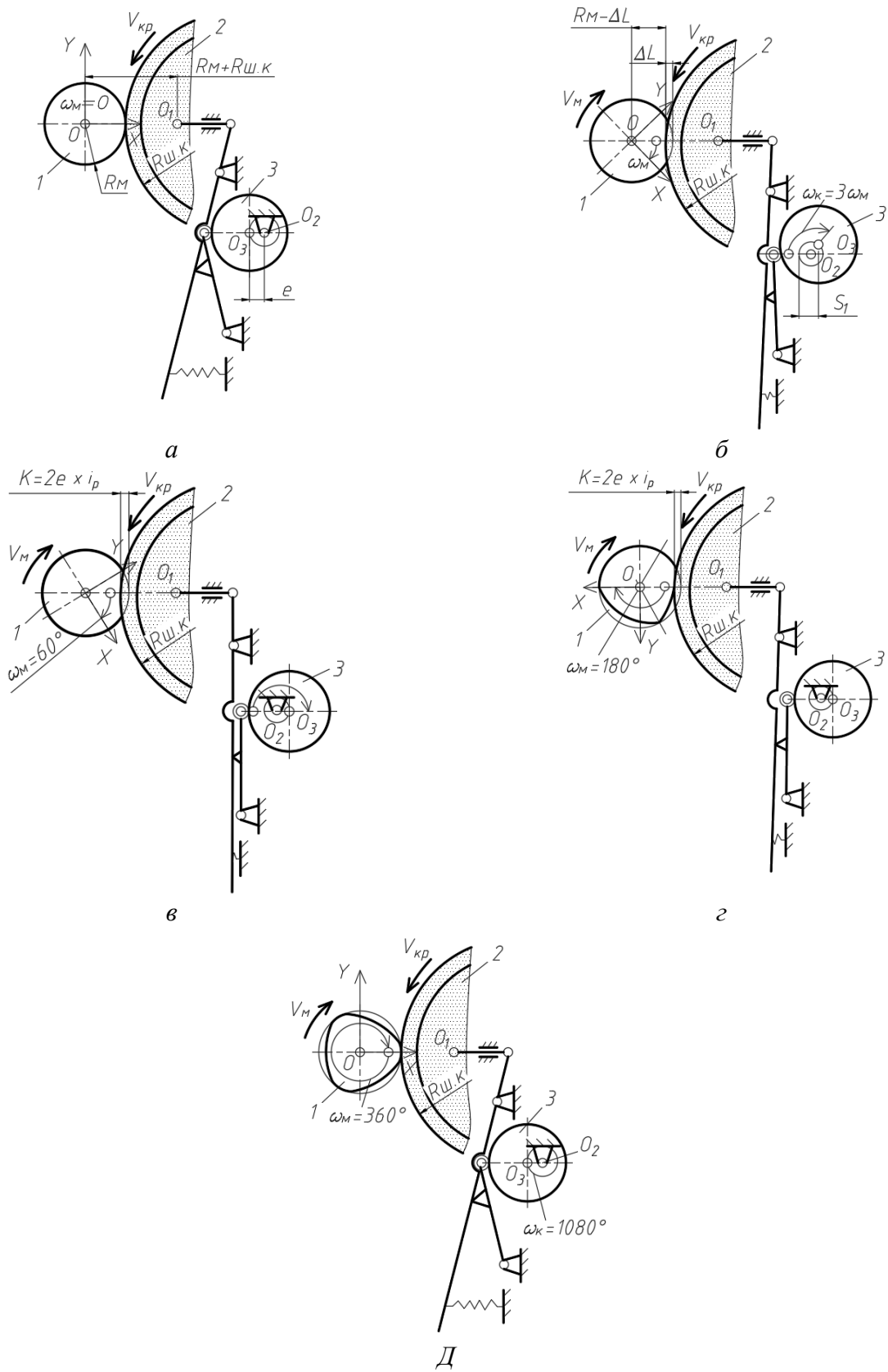
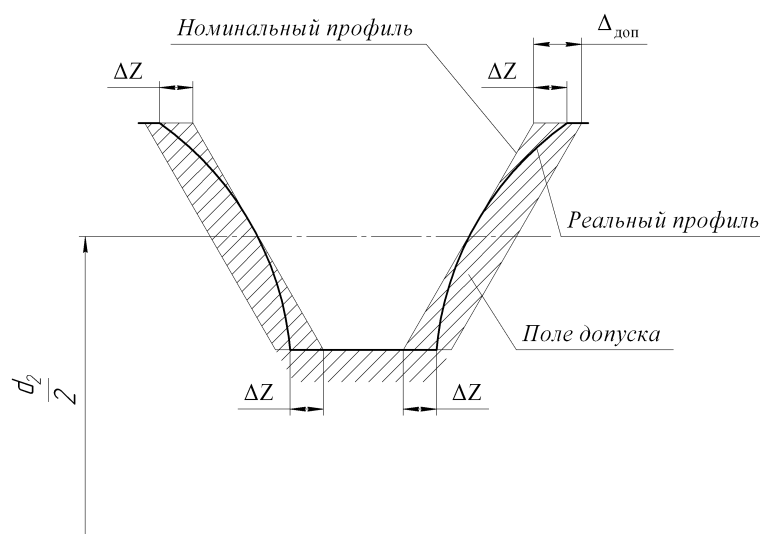


Рисунок 3. Схема образования контура поперечного сечения трехгранного метчика на резьбошлифовальном станке

В работах [1, 6, 7] показано, как реальная резьбовая поверхность метчика отличается от номинальной и обусловлена существующей технологией ее изготовления.



**Рисунок 4.** 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 увеличатся. Для оценки величины погрешностей описывают процесс получения линий – образующих профиля резьбы [7].

Резьбовая поверхность затылованных по профилю зубьев рабочей части метчиков получается сложением двух движений шлифовального круга: винтового движения с параметром  $P$  и затылующего движения – радиального перемещения в сторону к оси метчика на величину затылования с параметром  $K$ . В таблице 1 показан пример результатов расчета отклонений реального от номинального профиля для затылованного метчика М4.

**Таблица 1.** Величина отклонения от номинального профиля координат точек реального профиля затылованных зубьев метчика М4

| $x$ , мм | $z$ , мм | $\Delta Z$ , мм |
|----------|----------|-----------------|
| 1,69715  | 0,13148  | 0,00028         |
| 1,78272  | 0,19479  | 0,01418         |
| 1,868362 | 0,25816  | 0,02811         |
| 1,954085 | 0,32159  | 0,04205         |
| 2,03984  | 0,38507  | 0,05602         |

Расчеты показывают, что отклонения профиля по среднему диаметру затылованного метчика составляет: для степеней точности  $H1$ ,  $H2$ ,  $H3$  – 180 %, а для  $H4$  – 90 % от поля допуска. Выполненный анализ показывает, что существующие технологические процессы изготовления метчиков М3...М6 не обеспечивают формирования рабочего профиля зубьев

метчиков согласно требованиям чертежа, что приводит к гарантированному появлению погрешностей, снижающих качество резьб.

Анализируя кинематические схемы образования контуров поперечных сечений пластически деформирующих метчиков, получим, что общепринятое обозначение геометрии контура одной величиной затылования  $K$  допустимо лишь при дополнительных указаниях о форме кривых кулачка затылования, модели станка и радиуса шлифовального круга.

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 трехгранного метчика составляет  $K_{don} = 0,07 d_0$ , для четырехгранного  $K_{don} = 0,04 d_0$ , для пятигранного  $K_{don} = 0,03 d_0$  и для шестигранного  $K_{don} = 0,02 d_0$  [1].

Для исключения указанных погрешностей предлагается рабочую поверхность на рабочей части метчика формировать в процессе токарной операции резьбовыми резцами. В этом случае нет необходимости в сложной настройке, выполняемой при резьбошлифовании, что исключает погрешности подрезания профиля.

Однако при обычном нарезании основной резьбы на поверхности отсутствует затылование. Затылование необходимо в конструкции зубьев метчика для уменьшения сил трения на рабочих поверхностях [4, 6, 7]. Для обеспечения затылованных поверхностей в СевГУ предложен следующий способ их формообразования методом пересечения правой и левой многозаходных резьб с основной резьбой [8, 9].

Затылование боковых поверхностей зубьев метчика, имеющего  $n$  перьев, осуществляют нарезанием на витках основной резьбы  $(n + 1)$  – заходной правой и  $(n - 1)$  – заходной левой резьб с шагом основной резьбы метчика, причем начало заходов правых резьб смещают на  $\frac{360^\circ}{n + 1}$ , а левых – на  $\frac{360^\circ}{n - 1}$  относительно захода основной резьбы.

В результате этого на рабочей поверхности инструмента образуется зубчатый рельеф, развертка которого представлена на рисунке 5. Единичный зуб данного рельефа представляет собой пирамиду с ромбом в основании (рисунок 6).

Способ изготовления метчика на токарно-винторезном станке при затыловании, например трехперого метчика (М6×1) с нарезанной основной резьбой осуществляется следующим образом.

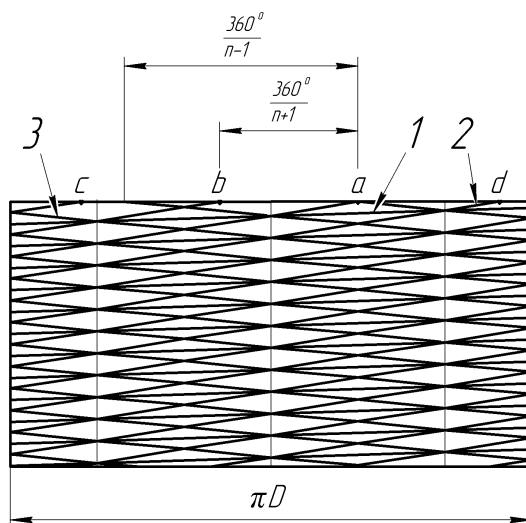
Определяют относительное угловое положение затылуемого метчика и инструмента (рисунок 6 и 7). Отсчет ведут от начала основной резьбы 1 в точке  $a$ . Затем режут правую затылующую четырехзаходную резьбу 2 с началом заходов в точках  $a, b, c, d$ .

При этом происходит пересечение винтовых поверхностей основной резьбы и правой затылующей, и за счет этого снимается припуск с правой стороны зубьев метчика, обеспечивая затылование правой стороны.

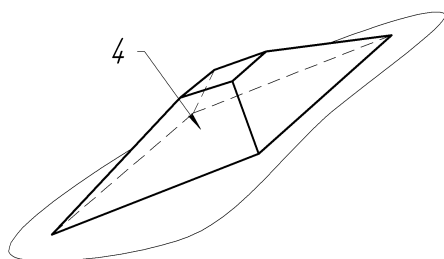
После этого режут левую затылующую резьбу 3 двухзаходную с началом заходов в точках  $a$  и  $c$ . При этом получают затылование левых и задних поверхностей зубьев 4 метчика.

Предложенный способ позволяет при минимальных затратах, т.е. без специального технологического оборудования получить конструкции режущих, деформирующих и де-

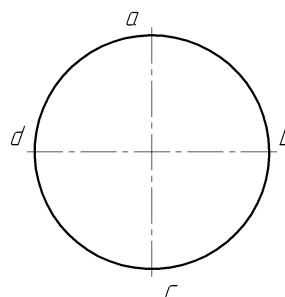
формирующе-режущих метчиков, используя для этого универсальные токарно-винторезные или резьбошлифовальные (для мелкоразмерных метчиков) станки без дополнительных радиально-затыловочных механизмов, исключая искажения профиля зубьев и позволяя тем самым повысить их точность.



**Рисунок 5.** Развертка рабочей поверхности метчика, полученной пересечением многозаходных резьб (2, 3) с витками основной резьбы (1)



**Рисунок 6.** Вид зуба рабочей части, развернутого основанием на плоскость



**Рисунок 7.** Координаты захода основной и затылюющих резьб на торце заготовки метчика

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса мелкоразмерной резьбообработки с использованием метчиков, затылованных способом радиальной подачи и метчиков, зубья которых получены методом пересечения правой и левой многозаходных резьб с основной резьбой [10, 11], подтверждают преимущество последних не только по точности обработки резьбового отверстия, но также по стойкости и экономической эффективности.

### Список литературы

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. Анпилов// 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 мелкогабаритных резьб метчиками в алюминиевых сплавах / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
8. А.с. № 630036 SU. Способ изготовления метчика/ Канареев Ф.Н., Харченко А.О., Сергеева Н.М.; заявитель и правообладатель Севастопольский приборостр. ин-т.; опубл. 30.10.1978.
9. Пат. № 64951 UA. Способ изготовления метчика/ Канареев Ф.Н., Харченко А.О., Новиков П.А.; заявитель и правообладатель Севастопольский нац. техн. ун-т.; опубл. 25.11.2011.
10. Харченко А.О. Прогрессивные устройства и инструменты для мелкогабаритного резьбонарезания в отверстиях / А.О. Харченко, А.А. Харченко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2023. № 2 (358). – С. 35-41. DOI:10.33979/2073-7408-2023-358-2-35-41.
11. Харченко А.О. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении / А.О. Харченко, С.М. Братан, А.А. Харченко, Е.А. Владецкий. – М.: Центркаталог, 2022. – 288 с.

УДК 666.9-127

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ОКСИДА ГРАФЕНА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМОПОДОБНОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО НА СПЛАВЕ ВТ6 МИКРО-ДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ**

**Н.Ю. Перетягин<sup>1,2</sup>,  
Н.Г. Ундрицова<sup>1,2</sup>,  
П.Ю. Перетягин<sup>1,2</sup>,  
О.О. Янушевич<sup>1</sup>,  
Н.И. Крихели<sup>1</sup>,  
О.В. Крамар<sup>1</sup>,  
М.С. Ноздрина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова, Москва, Российская федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская федерация

### **АННОТАЦИЯ**

На титановом сплаве ВТ6 микро-дуговым оксидированием в силикатно-гипофосфитном электролите получены керамоподобные покрытия с различным содержанием оксида графена. Проведено исследование влияния различных концентраций оксида графена в силикатно-гипофосфитном электролите на трибологические свойства керамоподобных покрытий, полученных микро-дуговым оксидированием. Трибологические испытания проводились в

режиме сухого трения по схеме «шар-на-диске» с приложенной нагрузкой 5 Н, скоростью скольжения 0,1 м/с и путем скольжения 1000 м. Исследование показало, что увеличение концентрации оксида графена в силикатно-гипофосфитном электролите приводит к уменьшению скорости изнашивания более чем в 1,5 раза и незначительному снижению коэффициента трения.

**Ключевые слова:** титан, титановый сплав ВТ6, микро-дуговое оксидирование, оксид графена, трение.

## **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GRAPHENE OXIDE ADDITIVES ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CERAMIC-LIKE COATINGS OBTAINED ON VT6 ALLOY BY MICRO-ARC OXIDATION**

*N.Y. Peretyagin<sup>1,2</sup>,  
N.G. Undritsova<sup>1,2</sup>,  
P.Y. Peretyagin<sup>1,2</sup>,  
O.O. Yanushevich<sup>1</sup>,  
N.I. Krikheli<sup>1</sup>,  
O.V. Kramar<sup>1</sup>,  
M.S. Nozdrina<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *A.I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russian Federation*

### **ABSTRACT**

Ceramic-like coatings with different content of graphene oxide were obtained on titanium alloy VT6 by micro-arc oxidation in silicate-hypophosphite electrolyte. The influence of different concentrations of graphene oxide in silicate-hypophosphite electrolyte on tribological properties of ceramic-like coatings obtained by micro-arc oxidation was investigated. Tribological tests were carried out in dry friction mode using a ball-on-disk scheme with an applied load of 5 N, a sliding velocity of 0.1 m/s and a sliding path of 1000 m. The study showed that increasing the concentration of graphene oxide in the silicate-hypophosphite electrolyte leads to a decrease in wear rate by more than 1.5 times and an insignificant decrease in the friction coefficient.

**Keywords:** titanium, titanium alloy VT6, micro-arc oxidation, graphene oxide, friction.

В настоящее время вентильный сплав ВТ6, благодаря высокой удельной прочности, усталостной прочности и низкой плотности нашел широкое применение в различных отраслях промышленности [1-4]. Однако неудовлетворительные характеристики износостойкости данного сплава все еще ограничивают сферу его применения [5,6]. Поэтому исследование добавления новых фаз и методов упрочнения является актуальной задачей. Открытие графена, а также его производных (оксида графена, графеновых пластинок, углеродных нанотрубок и пр.), предоставило новые возможности для разработки современных композитных материалов с повышенными износостойкими характеристиками [7,8]. Микро-дуговое оксидирование – метод модификации поверхностного слоя с целью улучшения свойств материала подложки, который использует наращивание керамоподобного покрытия на поверхности вентильных металлов (Al, Mg, Zr, Ti и пр.) [9-13].

Целью данного исследования является анализ влияния добавок оксида графена на трибологические свойства покрытий, сформированных методом микро-дугового оксидирования в анодно-катодном режиме на титановом сплаве ВТ6.

В данном исследовании применялась водная суспензия оксида графена (ГрафенОкс, Черноголовка, Россия). Схематическое изображение процесса микро-дугового оксидирования представлено на рисунке 1 (рис. 1). Получение керамоподобного слоя на сплаве ВТ6 производилась на заготовках в форме диска Ø 27 мм и толщиной порядка 7 мм. Химический состав сплава ВТ6 представлен в таблице 1 (табл. 1).

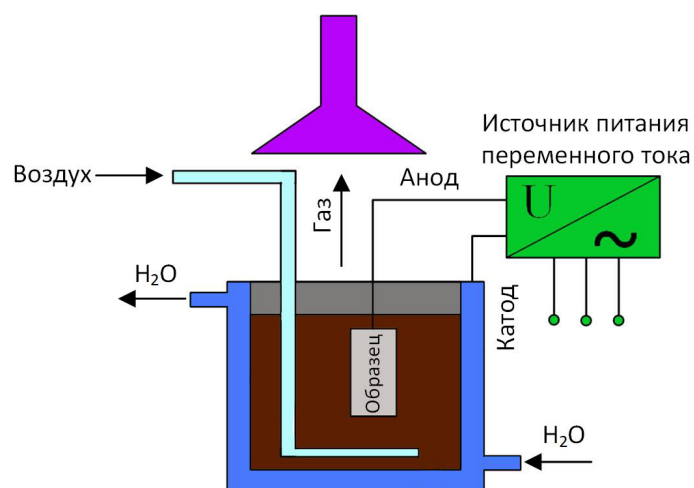


Рисунок 1. Процесс микро-дугового оксидирования

Таблица 1. Химический состав сплава ВТ6

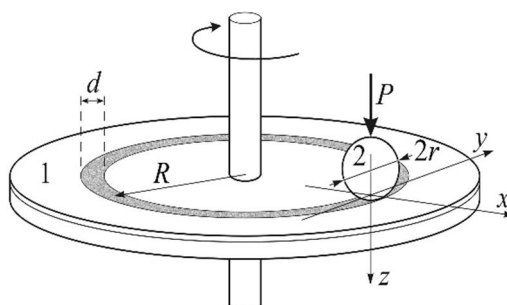
| Химический состав, вес. % |     |      |       |      |     |     |      |
|---------------------------|-----|------|-------|------|-----|-----|------|
| Al                        | V   | C    | H     | N    | Fe  | O   | Ti   |
| 5,9                       | 3,8 | 0,08 | 0,015 | 0,05 | 0,3 | 0,2 | Ост. |

Процесс микро-дугового оксидирования производился в анодно-катодном режиме (50 Гц) при продолжительности обработки 30 мин. Соотношение анодного и катодного тока равнялось 1:1, а плотность суммарного тока составляла 20 А/дм<sup>2</sup>. Электролит в процессе микродугового оксидирования имел следующий состав: основа – силикатно-гипофосфитный электролит, состоящий из 10 г/л Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O и 5 г/л Na(PH<sub>2</sub>)O<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O; добавки – оксид графена с концентрациями 0,1, 0,3 и 0,5 г/л, соответственно.

Трибологические испытания проводились в соответствии со стандартом ASTM G-99 (вращение диска относительно прижатого к нему неподвижного шарика) на триботестере UMT-3 (Bruker, Billerica, США). Схема фрикционного контакта согласно стандарту ASTM G-99 представлена на рисунке 2 (рис. 2).

Трибологические испытания проводились при комнатной температуре  $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности  $\sim 50\%$ . Путь трения  $S$  составлял 1000 м, постоянная нормальная нагрузка  $P = 5\text{ Н}$  прикладывалась к керамическому контртелу из оксида алюминия радиусом  $r = 2\text{ мм}$ , номинальный радиус трека износа  $R$  составлял 5 мм, а скорость вращения диска  $V$  равнялась 0,1 м/с (112,3 об/мин). Для каждого образца с различным содержанием оксида

графена было проведено по три испытания. Также во время исследования регистрировалась акустическая эмиссия в месте контакта.



**Рисунок 2.** Схема фрикционного контакта согласно стандарту ASTM G-99 (1-диск, 2-керамическое контр-тело)

Для измерения трехмерного профиля поверхности треков износа и исследования объемных потерь образцов  $\Delta V$  применялся профилометр Taylorsurf CLI 500 (Taylor Hobson, Leicester, Великобритания). Скорость износа рассчитывалась по следующему соотношению:

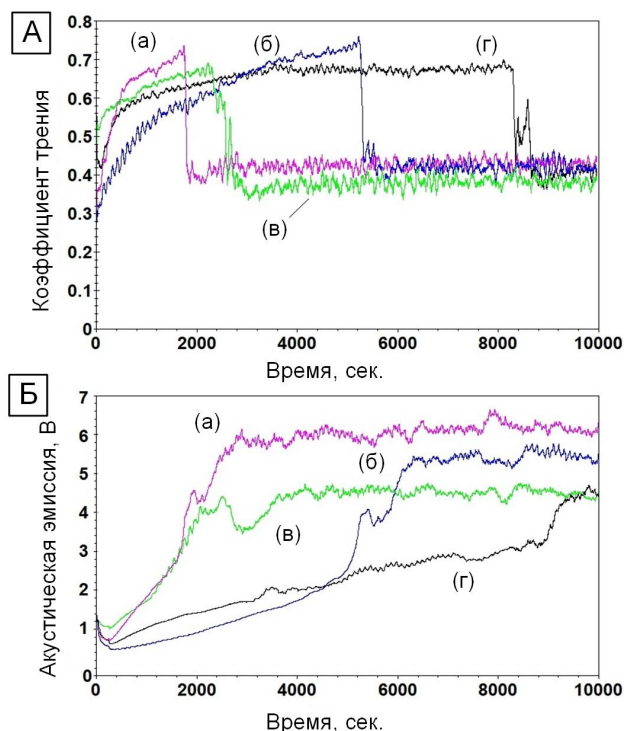
$$W = \Delta V / (P \cdot S), \quad (1)$$

где  $\Delta V$  – объемная потеря после испытаний ( $\text{мм}^3$ ),  $P$  – приложенная нагрузка (Н) и  $S$  – путь скольжения (м).

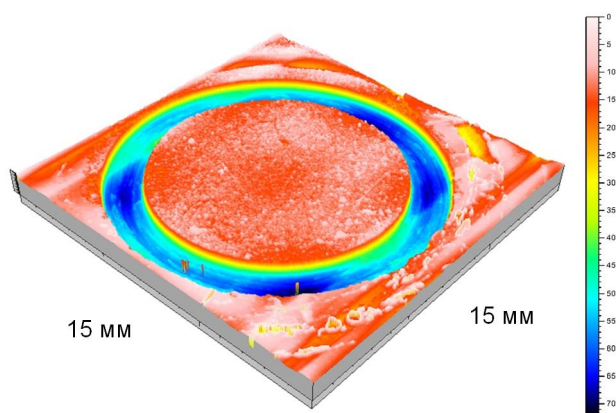
Морфология треков износа изучалась сканирующим электронным микроскопом VEGA 3 LMN (Tescan, Brno, Чехия). Для исследования влияния оксида графена на смазывающие свойства контртело исследовали на рамановском спектрокопе DXRTM2 (Thermo Fisher Scientific, Waltham, США).

На рисунке 3А (рис. 3А) представлены зависимости коэффициента трения от времени испытания, полученные при  $P = 5$  Н,  $V = 0,1$  м/с и  $S = 1000$  м. Анализ результатов показывает, что коэффициент трения для образцов содержащих 0, 0,1 и 0,3 г/л оксида графена не стабилизировался во время испытания, поэтому значение коэффициента трения было зафиксировано в момент разрушения покрытия. Разрушение характеризуется резким снижением коэффициента трения (рис. 3Б), а также изменением акустической эмиссии. Для образца содержащего 0,5 г/л оксида графена коэффициент трения стабилизировался во время испытания. После разрушения покрытия значение коэффициента трения соответствует фрикционному контакту контртело из оксида алюминия – подложка ВТ6. Разрушение покрытий при износе происходит из-за контактной усталости, и при увеличении концентрации оксида графена в электролите от 0 до 0,5 г/л этот процесс замедляетсякратно от менее чем 2000 до более чем 8000 с.

На рисунке 4 (рис. 4) представлена репрезентивная трехмерная топография трека износа образца, концентрация оксида графена в котором составляла 0,5 г/л, после трибологических испытаний. По полученным трехмерным топографиям поверхности трека износа была рассчитана потеря объема для определения скорости износа с помощью уравнения (1). Коэффициент трения и скорость износа для всех образцов представлены в таблице 2 (табл. 2). Анализ показывает, что покрытия, сформированные в электролитах с добавками ОГ, показали незначительное снижение COF с 0,74 до 0,69 и значительное снижение скорости износа с 8,12 до 5,1  $\text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$  при увеличении концентрации ОГ в электролите с 0 до 0,5 г/л. Важно, что износ измерялся после разрушения покрытия, включая износ подложки ВТ6 (согласно стандарту ASTM G-99, регламентирующему длину пути трения 1000 м или время испытания 10000 с при скорости скольжения 0,1 м/с).



**Рисунок 3.** Зависимость коэффициента трения (А) и акустической эмиссии (Б) от времени испытания для образцов с концентрацией 0 (а), 0,1 (б), 0,3 (в) и 0,5 (г) г/л оксида графена, соответственно



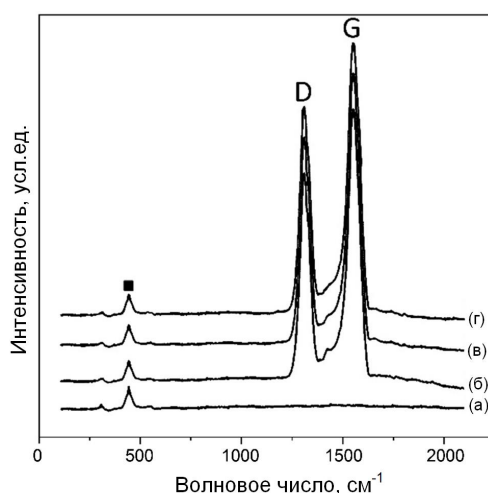
**Рисунок 4.** Репрезентативная трехмерная топография следа износа, соответствующего образцу с 0,5 г/л оксида графена

Таким образом, в процессе изнашивания образцов с покрытиями, сформированными в электролитах с добавками оксида графена, происходит выравнивание поверхности в результате износа выступов покрытия. В конце этой стадии процесс износа идет медленно, но происходит разрушение покрытия от границы раздела с подложкой. Время до разрушения зависит от условий испытания и концентрации оксида графена в электролите. Следовательно, наиболее вероятной причиной разрушения является развитие усталостной трещины на границе раздела покрытие - подложка с последующим выходом ее на поверхность.

Таблица 2. Результаты трибологических испытаний

| Содержание оксида графена, г/л | Коэффициент трения | Скорость износа, мм <sup>3</sup> /Н·м |
|--------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| 0                              | 0,74               | $8,12 \cdot 10^{-4}$                  |
| 0,1                            | 0,72               | $6,75 \cdot 10^{-4}$                  |
| 0,3                            | 0,70               | $5,87 \cdot 10^{-4}$                  |
| 0,5                            | 0,69               | $5,1 \cdot 10^{-4}$                   |

Наличие графитовых структур защищает поверхность во время триботестов благодаря эффекту самосмазывания. На рисунке 5 (рис. 5) показана спектроскопия комбинационного рассеяния алюминиевого шарика после трибологических испытаний с характерными пиками оксида графена, которые подтверждают, что во время трибологических испытаний произошел их перенос на поверхность контртела.



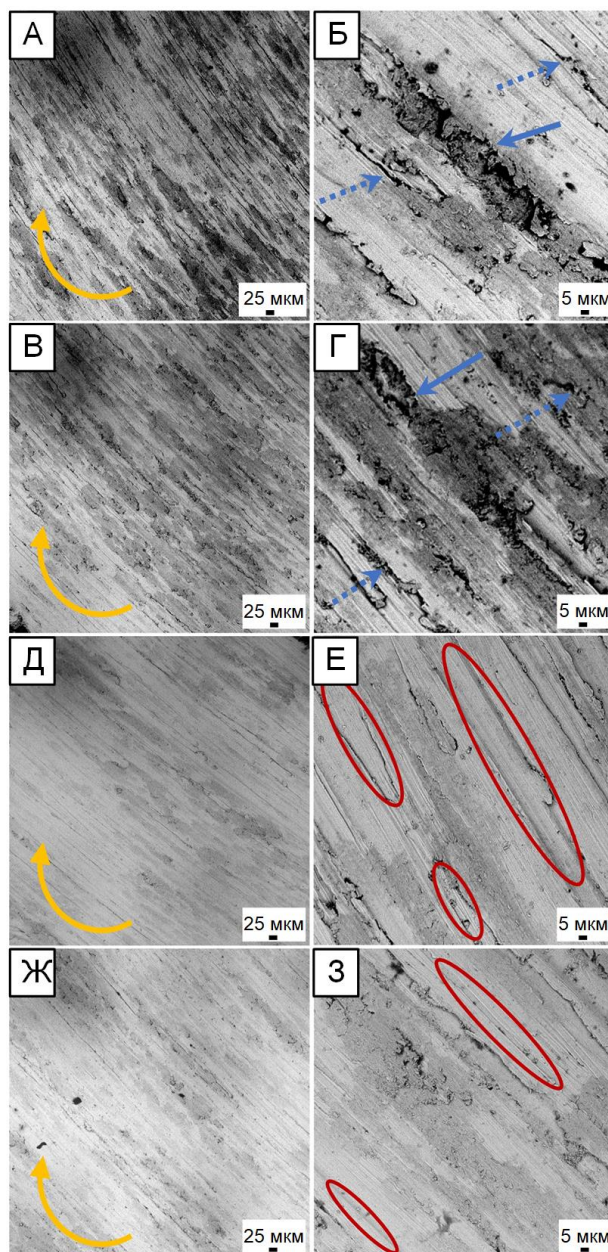
**Рисунок 5.** Рамановская спектроскопия изношенной поверхности алюминиевых шариков после трибологических испытаний образцов с 0 (а), 0,1 (б), 0,3 (в) и 0,5 г/л (г) оксида графена.

Где "D" и "G" пики оксида графена, и "■" – пик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Влияние смазочного слоя на процесс изнашивания можно проанализировать по снимкам изношенных поверхностей (рис. 6). Важно, что покрытия разрушаются во время испытаний на износ, но оксид графеновые структуры присутствуют на поверхности контртела и сплава Ti6Al4V, за исключением образца, не содержащего добавки. Морфология треков износа образцов с 0,5 и 0,3 г/л оксида графена более гладкая, чем у образцов с 0,1 г/л и не содержащего оксида графена.

Таким образом, увеличение концентрации оксида графена (с 0 г/л до 0,5 г/л) в силикатно-гипофосфитном электролите при процессе микро-дугового оксидирования титанового сплава ВТ6 продемонстрировало, что коэффициент трения и скорость изнашивания

покрытий снижаются с 0,73 до 0,69 и с 8,04 до 5,2 мм<sup>3</sup>/Н·м. Это происходит в следствии образования оксид графеного смазочного трибослоя при контакте покрытия и контртела в паре трения, что подтверждается рамановской спектроскопией их изношенных поверхностей. Разрушение покрытий в процессе износа происходит из-за контактной усталости, и с увеличением концентрации оксида графена в электролите этот процесскратно замедляется от менее чем 2000 с до более чем 8000 с.



**Рисунок 6.** Снимок изношенной поверхности образцов с 0 (А,Б), 0.1ОГ (В , Г), 0.3ОГ (Д , Е) и 0.5ОГ (Ж , З) после трения алюминиевым шариком. Желтые, синие и голубые стрелки показывают направление вращения, признаки вырывания и трещины, соответственно. Канавки на треках износа отмечены красным овалом

Работа выполнена при поддержке Министерства здравоохранения Российской Федерации в рамках проекта №056-00041-23-00. Авторы проводили исследования на оборудовании, предоставленном Центром коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» (договор № 075-15-2021-695 от 26 июля 2021 г.).

### **Список литературы**

1. Sieniawski J. The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys / J. Sieniawski, R. Filip, W. Ziaja // *J. Mater. Process. Technol.* – 2003. – vol. 133, – P. 84–89.
2. Kaur M. Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications / M. Kaur, K. Singh // *Mater. Sci. Eng. C.* – 2019. – vol. 102, – P. 844–862.
3. Smurov I. Optical Monitoring in Laser Cladding of Ti6Al4V / I. Smurov, M. Doubenskaia, S. Grigoriev, A. Nazarov // *J. Therm. Spray Technol.* – 2012. – vol. 21, – P. 1357–1362.
4. Lei Z. Analysis of anisotropy mechanism in the mechanical property of titanium alloy tube formed through hot flow forming / Z. Lei, P. Gao, X. Wang, M. Zhan, H. Li // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2021. – vol. 86, – P. 77–90.
5. Li Y. Effect of novel surface treatment on corrosion behavior and mechanical properties of a titanium alloy / Y. Li, Q. Zhou, M. Liu // *Baosteel Technol. Res.* – 2021. – vol. 15, – P. 11–19.
6. Li J. Structure and tribological properties of TiSiCN coating on Ti6Al4V by arc ion plating / J. Li, Y. Wang, Y. Yao, Y. Wang, L. Wang // *Thin Solid Films.* – 2017. – vol. 644, – P. 115–119.
7. Novoselov K.S. Electric field effect in atomically thin carbon films // K.S. Novoselov, A.K. Geim, A.K. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigoriev, A.A. Firsov // *Science.* – 2004. – vol. 306, – P. 666–669.
8. Smirnov A. Processing and mechanical properties of new hierarchical metal-graphene flakes reinforced ceramic matrix composites / A. Smirnov, P. Peretyagin, J.F. Bartolomé // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2019. – vol. 39, – P. 3491–3497.
9. Эпельфельд А.В. Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий. Микродуговое оксидирование / А.В. Эпельфельд, П.Н. Белкин, А.М. Борисов, В.А. Васин, Б.Л. Крит, В.Б. Людин, О.В. Сомов, В.А. Сорокин, И.В. Суминов, В.П. Францкевич // – г. Санкт-Петербург: Реноме, 2017. – Т. 1, – стр. 648 с. ISBN 978-5-91918-832-2.
10. Grigoriev S. Investigation of MAO Coatings Characteristics on Titanium Products Obtained by EBM Method Using Additive Manufacturing / S. Grigoriev, N. Peretyagin, A. Apelfeld, A. Smirnov, O. Yanushevich, N. Krikheli, O. Kramar, S.Kramar, P. Peretyagin // *Materials.* – 2022. – vol. 15, – P. 4535.
11. Grigoriev S. Investigation of the Characteristics of MAO Coatings Formed on Ti6Al4V Titanium Alloy in Electrolytes with Graphene Oxide Additives / S. Grigoriev, N. Peretyagin, A. Apelfeld, A. Smirnov, A. Rybkina, E. Kameneva, A. Zheltukhin, M. Gerasimov, M. Volosova, O. Yanushevich, et al. // *J. Compos. Sci.* – 2023. – vol. 7, – P. 142.
12. Chen X. Friction and wear behavior of graphene-modified titanium alloy micro-arc oxidation coatings / X. Chen, D. Liao, D. Zhang, I. Jiang, P. Zhao, R. Xu // *Trans. Indian Inst. Met.* – 2020. – vol. 73, – P. 73–80.
13. Borisov A.M. Microarc oxidation in slurry electrolytes: A review. / A.M. Borisov, B.L. Krit, V.B. Lyudin, N.V. Morozova, I.V. Suminov, A.V. Apelfeld // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* – 2016. – vol. 52, – P. 50–78.

УДК 621.9

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСКРЕТНОГО ОКСИДНОГО СЛОЯ НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ МАТЕРИАЛЕ**

*А.В. Журавлёв<sup>1</sup>,  
Е.А. Чекалова<sup>1</sup>,  
В.В. Овчинников<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Московский политехнический университет г. Москва, Россия*

### **АННОТАЦИЯ**

Предложена технология формирования диффузионного дискретного оксидного слоя на инструментальный материал. Представлены результаты исследования структуры и физико-механических свойств инструментального материала за счет формирования комбинированного оксидирования. В ходе исследований было установлено, что микротвердость после оксидирования образцов из конструкционной легированной стали увеличилась примерно в 2 раза по сравнению с микротвердостью исходной структуры.

**Ключевые слова:** диффузионное дискретное оксидирование, нестехиометрическая структура, микротвердость.

## **INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A DISCRETE OXIDE LAYER ON A TOOL MATERIAL**

*A.V. Zhuravlev<sup>1</sup>,  
E. A. Chekalova<sup>1</sup>,  
V.V. Ovchinnikov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

### **ABSTRACT**

A technology for the formation of a diffusion discrete oxide layer on a structural material is proposed. The results of a study of the structure and properties of structural alloyed steels due to the formation of discrete diffusion oxidation are presented. In the course of research, it was found that the microhardness after oxidation and polishing of samples from a structural alloyed structure is 2 times higher than the microhardness of the original structure.

**Keywords:** diffusive discrete oxidation, nonstoichiometric structure, microhardness.

### **Введение**

В современном машиностроительном производстве все большее применение находит сложное автоматизированное станочное оборудование. Эффективное использование такого оборудования возможно только при достаточной надежности его функционирования, причем среди многих причин отказов станочного оборудования главными являются отказы режущего инструмента, который является наиболее слабым звеном технологической системы [1].

Для повышения режущих и стойкостных свойств инструмента используются многообразные способы поверхностного модифицирования и нанесения покрытий [2-7].

Нанесение износостойких покрытий является одним из эффективных способов повышения работоспособности режущих инструментов. Но в ряде случаев эффективность покрытий недостаточна, поскольку режущие инструменты работают в условиях воздействия сложного комплекса факторов, например, высоких контактных напряжений и температур, а также в условиях активного протекания физико-химических процессов. Разрушение покрытий в процессе резания начинается с образования в них трещин, возникновение которых связано, в зависимости от условий резания, с упругопластическими деформациями режущего клина режущего инструмента, колебаниями температур и силовых нагрузок, возникающих в процессе резания. Поэтому для повышения долговечности сложнопрофильного режущего инструмента используют покрытия с легирующими элементами [2, 3, 7, 8], в качестве легирующих элементов сегодня используют кремний, алюминий, рений и другие элементы из ряда металлов.

Существует многообразие разнообразных типов покрытий с различной структурой. Меняется число компонентов покрытия, варьируются добавочные элементы, меняется число слоев покрытия.

Однако при обработке инструментальный материал с многослойным покрытием нередко разрушается. Процесс разрушения обычно сопровождается образованием трещин в менее прочном слое.

Среди многих причин разрушения покрытия на контактных площадках инструмента можно отметить микроползучесть инструментального материала и склонность режущей части инструмента к упругим прогибам и потере формоустойчивости.

Процесс разрушения обычно сопровождается образованием трещин в менее прочном слое. Затем трещина выходит на границу раздела двух слоев многослойного покрытия и переходит в трещину скольжения, которая развивается вдоль этой границы, расслаивая многослойное покрытие. В это время зарождается микротрещина, которая за какое-то время приведет к разрушению этого слоя. Большое влияние на механические свойства покрытий оказывает модуль упругости и вязкость разрушения материала покрытий [1, 2, 3].

Использование диффузионного дискретного оксидирования приводит к уменьшению эффективного значения модуля упругости, сравнительно с традиционным ионно-плазменным покрытием, что приводит к улучшению его пластических свойств, способствующих релаксации напряжений.

Формирование на поверхности инструментального материала дискретного оксидного слоя нестехиометрической структуры, способствует релаксации напряжений, что приводит к препятствию распространения трещин и даже её остановки в процессе эксплуатации на границе раздела материала инструмента и покрытия, повышая, таким образом, долговечность материала.

Таким образом, материал с дискретным диффузионным поверхностным оксидным слоем способствует увеличению запаса пластичности при сохранении прочности и твердости, что снижает склонность к потере формоустойчивости и упругим прогибам при приложении термомеханических нагрузок.

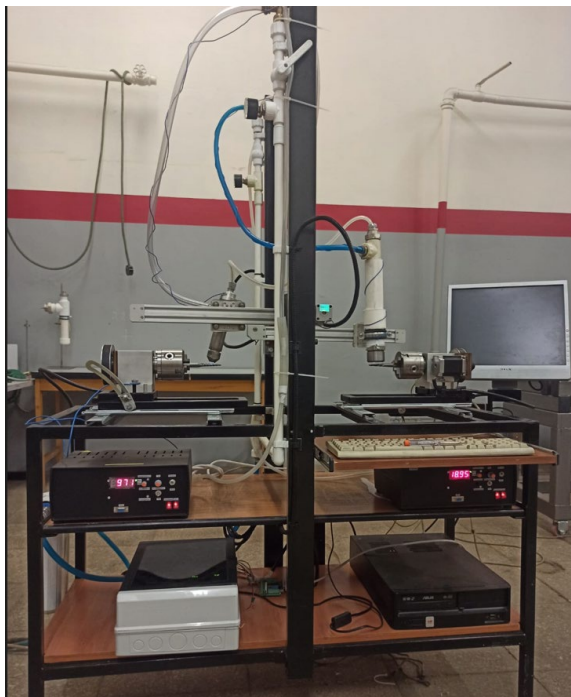
Целью работы является исследование физико-механических свойств дискретного оксидного слоя на инструментальных материалах.

### **Методика проведения исследований**

Для формирования диффузионного оксидного слоя на поверхность конструкционного материала было использовано оборудование, которое состоит из озонатора «УИВ-2» и электромеханического блока. Оборудование обеспечено изоляционными материалами от

высоковольтного тока и представляет собой единую конструкцию.

Устройство «УИВ-2» обеспечивает формирование на поверхности образцов диффузионный дискретный оксидный слой, а электромеханический блок позволял реализовать упорядоченную совокупность локальных областей, разделенных промежутками с его практическим отсутствием, именуемую в работе диффузионным дискретным оксидным слоем [6–8]. Дополнительно входит монитор, компьютер, блок драйверов и системное обеспечение. Внешний вид разработанного оборудования представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Оборудование для синтеза диффузионного дискретного оксидного слоя

В процессе обработки деталь закрепляют либо в поворотную ось с блоком управления шагового двигателя, либо закрепляют на установочном рабочем столе. Затем выставляют заданную частоту вращения или заданную подачу линейного перемещения по компьютерной программе «Math». Линейный модуль совершает возвратно-поступательное движение, если деталь закреплена неподвижно.

Определение микротвердости образцов выполнялось кинетическим индентированием согласно ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3М. Прибор позволяет наносить отпечатки, по которым можно оценить микротвердость очень тонких покрытий (до 0,05 мкм), что не позволяют стандартные приборы. Данные по твердости оценивались по шкале Виккерса. Для определения структуры применяли сканирующий микроскоп. Прибор позволяет выполнить сканирование поверхности при проведении квазистатических испытаний с высокой скоростью проведения измерений и стабильно высоким качеством. Было проведено 15 измерений.

Для исследования структуры поверхностных слоев исследуемых сталей использовался оптический микроскоп Olympus GX-71.

Объектами исследований служили образцы из инструментального материала Р6М5, Т15К6 после комбинированного оксидирования, оксидированием лазерным способом и диффузионным.

### Обсуждение результатов исследования

Диффузионное оксидирование может быть различным, поскольку для каждого материала формирование оксидов будет носить свой индивидуальный характер, в зависимости от химического состава инструментального материала.

Поверхностный слой металла быстро заполняется хемосорбированным окислителем и образуется тонкий слой оксида. При пониженных температурах осуществления процесса после хемосорбированного кислорода за счет ван-дер-ваальсовых сил может возникнуть и физическая адсорбция молекул кислорода.

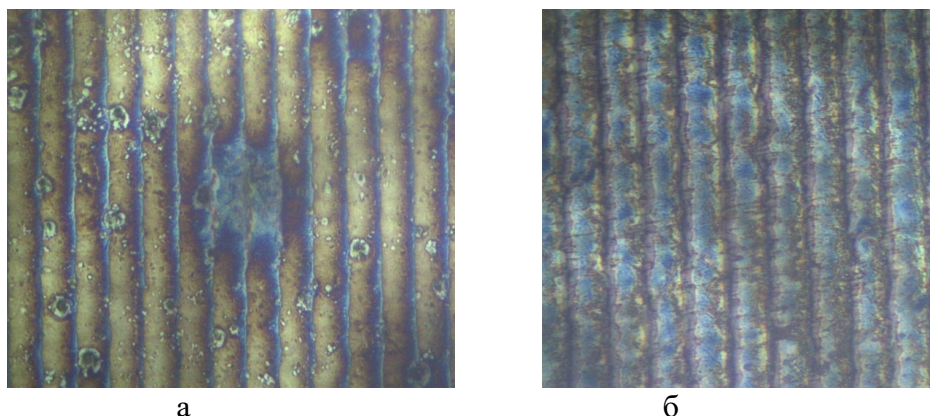
Если между металлом и кислородом есть химическое сродство (оксид термодинамически стабильный), то пленка, состоящая из хемосорбированного кислорода, превращается в оксидную пленку. Металл и кислород в оксидной пленке создают ионную связь. В таком случае очень быстро возникает слой хемосорбированного кислорода и в то же время в оксидах формируется значительное электрическое поле. На поверхности раздела  $\text{Me}-\text{MeO}$  образуются катионы, а на поверхности раздела  $\text{MeO}-\text{O}_2$  образуются анионы кислорода.

Электрическое поле способствует миграции катионов к поверхности раздела  $\text{MeO}-\text{O}_2$ . Таким образом, любой кристалл, находящийся при температуре, отличной от нуля, всегда будет содержать определенное число дефектов структуры. Металл переходит в термодинамически неустойчивое неравновесное состояние с повышенной внутренней энергией.

Дискретное оксидирование позволяет получить нестехиометрическую структуру, которое в дальнейшем переходит в стехиометрическую, создавая на поверхности тонкую оксидную пленку [7, 8].

Повышение содержания кислорода в поверхностном слое в форме твердого раствора внедрения сопровождается увеличением удельного объема, формированием остаточных сжимающих напряжений, повышением твердости и износостойкости. Этим объясняется упрочнение материалов при их обработке.

В ходе металлографических исследований было получено, что структура для быстрорежущего материала Р6М5 после лазерного оксидирования имеет равномерную дорожку 2а, а после диффузионного оксидирования сглаживание 2б, (см. рисунок 2).

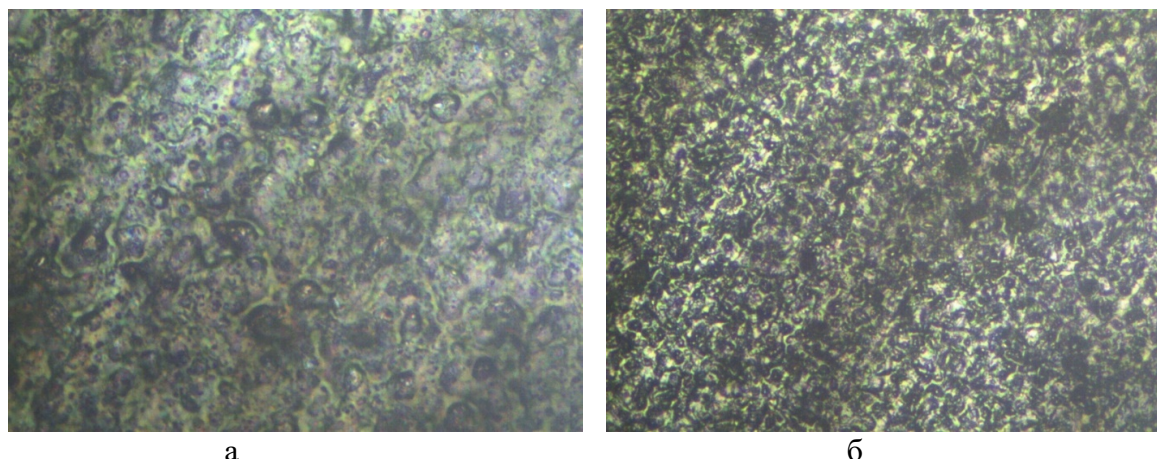


**Рисунок 2.** Микроструктура поверхности образца Р6М5 после комбинированного оксидирования (увеличение  $\times 200$ ): а – лазерное оксидирование; б – диффузионное оксидирование

Результаты исследований показали, что при синтезе дискретного диффузионного слоя на стали в первую очередь происходит образование гематита. Формирование гематита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) наблюдается при относительно высоком содержании кислорода на начальной стадии процесса.

Затем по мере снижения концентрации кислорода в ионизированном воздухе под слоем гематита образуется слой магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и еще ниже слой вюстита ( $\text{FeO}$ ) в виде тонкой дискретной эпитаксиальной плёнки.

Однако структура для твердосплавного материала T15K6 после лазерного оксидирования имеет не равномерную пупырчатость 3а, а после диффузионного оксидирования сглаживание 3б, (см. рисунок 3).



**Рисунок 3.** Микроструктура поверхности образца T15K6 после комбинированного оксидирования (увеличение  $\times 200$ ): а – лазерное оксидирование; б – диффузионное оксидирование

Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания, W и Fe в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и образования оксидов  $\text{Fe}_x\text{O}_y$  и возможно, оксидов вольфрама.

Определение микротвердости поверхности исследуемых материалов после комбинированного оксидирования приведены в таблице 1.

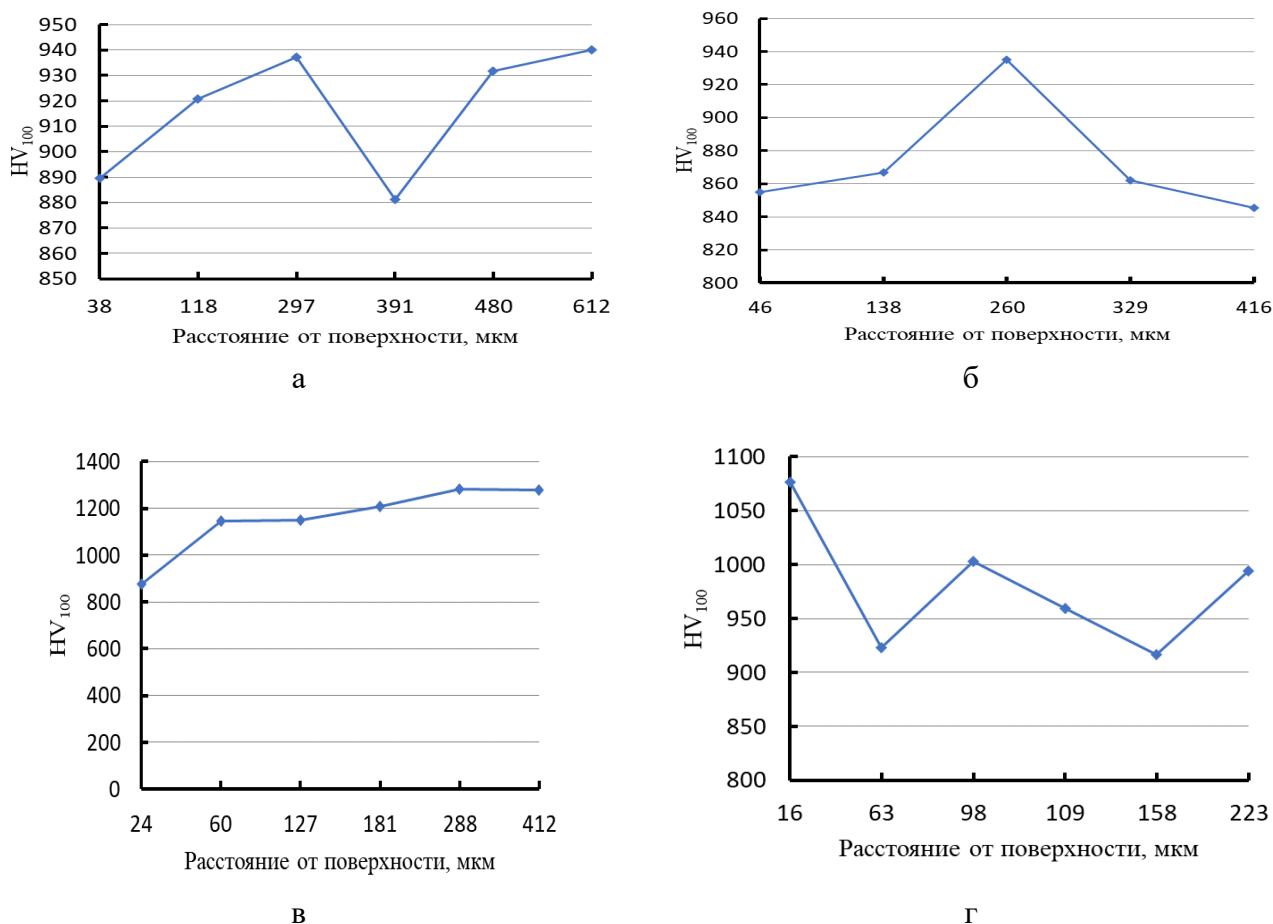
Таблица 1 – Результаты определения микротвердости образцов исследуемых материалов

| Образец Р6М5                                            | Микротвердость |         |         |         |         |
|---------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| после диффузионного оксидирования ( $\text{HV}_{100}$ ) | 764,805        | 905,608 | 706,140 | 684,963 | 762,063 |
| после лазерного оксидирования ( $\text{HV}_{20}$ )      | 711,587        | 672,208 | 844,039 | 925,598 | 782,19  |

| Образец T15K6                             | Микротвердость ( $\text{HV}_{100}$ ) |         |         |         |         |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Образец после диффузионного оксидирования | 1131,97                              | 585,168 | 824,563 | 1434,19 | 879,076 |
| Образец после лазерного оксидирования     | 1482,49                              | 1128,10 | 623,29  | 812,613 | 1329,45 |

Данные таблицы 1 показывают, что после диффузионного оксидирования микротвердость поверхностного слоя немного уменьшилась и составляет примерно 0,9–1,12%.

На рисунке 4 приведены графики распределения твердости по сечению образца в направлении от поверхности вглубь для быстрорежущей стали Р6М5 (рис. 4, а, б) и твердого сплава Т15К6 после лазерного оксидирования (рис. 4, в, г).



**Рисунок 4.** Распределение микротвердости в направлении вглубь

### Выводы:

1. Фазовый состав и структура синтезируемого поверхностного оксидного слоя определяется во многом химическим составом материала, служащей подложкой. Наличие поверхностного оксидного слоя препятствует распространению трещины на границе между ним и подложкой.
2. Образование поверхностного оксидного слоя на инструментальных материалах способствует формированию на поверхности поля остаточных сжимающих напряжений.
3. Для инструментального материала наиболее существенное увеличение микротвердости наблюдается для варианта лазерного оксидирования. Последующее диффузионное оксидирование приводит к небольшому снижению микротвердости поверхности примерно 0,9–1,12%.

### Список литературы

1. Чекалова Е. А. Повышение долговечности режущего инструмента и тяжелонагруженных деталей методом нанесения диффузионного сетчатого покрытия: монография. – М.: Изд-во Университет машиностроения, 2014. – 127 п. с.
2. Новиков И.И., Ермишкин В.А «Физическая механика реальных материалов» Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН - М. Наука 2004г. –310с.
3. Чекалова Е.А. Повышение долговечности изделий из титановых сплавов путем нанесения локального оксидного покрытия/ Е.А. Чекалова//Нанотехнологии: наука и производство. – 2017. – №3. – С.29-37.
4. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов: учебное пособие для вузов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М.: Высшая школа, 1985. – 256 с.
5. Чекалова Е.А. Исследование износостойких покрытий на титановом сплаве ВТ3-1/Е. А. Чекалова // «Материаловедение» – 2017. – № 9. – С. 3 – 6.
6. Чекалова Е.А. Способ формирования износостойкого покрытия на поверхности металлической детали / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов, Р. Д. Соломатина // Патент 2548835 РФ на изобретение, МПК С23С8/36. Опубликовано 20.04.2015 г. Патентообладатель: Чекалова Е. А.
7. Чекалова Е.А. Устройство для поверхностного упрочнения металлической поверхности / Е. А. Чекалова, А.В. Журавлёв // Патент 2748675 РФ на изобретение, МПК С23С8/36, С23С14/56. Опубликовано 28.05.2021 г. Патентообладатель: Чекалова Е. А., А.В. Журавлёв.
8. Chekalova E.A. Increased Material Durability with a Discrete Oxide Layer. / Chekalova, E.A., Zhuravlev, A.V.// Key Engineering Materials, 2022, 910 KEM, с. 604–609.