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

«Севастопольский государственный университет»

№ 2(30)

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. №2 (30)

*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
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

Колесов А.Г., Шабля Д.Л. Разработка устройства для микрошлифовальной обработки твердосплавных фильер.....	4
Григорьев С.Н., Волосова М.А., Федоров С.В. К вопросу о применении электроэрозионной обработки для поверхностной модификации диэлектрических керамик.....	13
Фисоченко Ю.А., Колесов А.Г. Системный анализ процесса фрезерования на станках с ЧПУ.....	22
Метель А.С., Мельник Ю.А., Волосова М.А., Мустафаев Э.С. Повышение эффективности микрофрезерования и срока службы микроконцевых фрез в результате обработки быстрыми атомами и осаждения износостойких покрытий.....	27
Новиков Л.Л., Левченко Е.А. Повышение эффективности электрохимического шлифования направляющих линейных подшипников.....	34
Умеров Э.Д., Абдулгизис У.А. Теплофизические особенности контактного взаимодействия в зоне резания при подаче масляной СОТС с присадками наноглинистых минералов.....	44

УДК 621.9-219.1-752

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ МИКРОШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ФИЛЬЕР

***А.Г. Колесов¹,
Д.Л. Шабля¹***

¹ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Данная статья посвящена описанию разработанного специального устройства для микрошлифовальной обработки твердосплавных фильер. В качестве привода данного устройства был доработан и использован высокоскоростной пневмоэлектрический привод вращения инструмента, позволяющий обеспечить окружную скорость шлифовальной головки до 35 м/с и частоту вращения порядка 400000 об/мин.

Ключевые слова: микрошлифование, устройство, микрошлифовальный инструмент, абразивный материал.

RESEARCH PROCESS WORLD OF GRINDING PRECISIONAL SURFACES OF ACCELEROMETER PENDULUMS

***A.G. Kolesov¹,
D.L. Shablya¹***

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

This article is devoted to the description of the developed special device for micro-grinding of carbide dies. As the drive of this device, a high-speed pneumoelectric tool rotation drive was modified and used, which allows for a circumferential speed of the grinding head of 25-35 m/s and a rotation speed of about 400,000 rpm.

Keywords: micro-grinding, device, micro-grinding tool, abrasive material.

Постановка проблемы.

В настоящее время для изготовления проволоки, различного длинномерного проката и т.д. применяются фильеры от качества изготовления которых зависит точность получаемых изделий [2].

Фильера (волока) – это специальный инструмент для обработки металла давлением, через отверстие которого протягивается проволока. Она предназначена для обработки как металлических, так и неметаллических изделий. В результате процесса волочения, площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а ее длина увеличивается (рис. 1).

Фильера представляет собой конструкцию, выполненную в виде тела вращения сложной конфигурации. Она имеет специфическую конструкцию, представленную внутренним каналом воронкообразного типа, который обрабатывается по 4 – 5 качеству, с шероховатостью поверхности Ra 0,1 – 0,16 мкм [3]. Пример такой конструкции приведен на рис. 2.

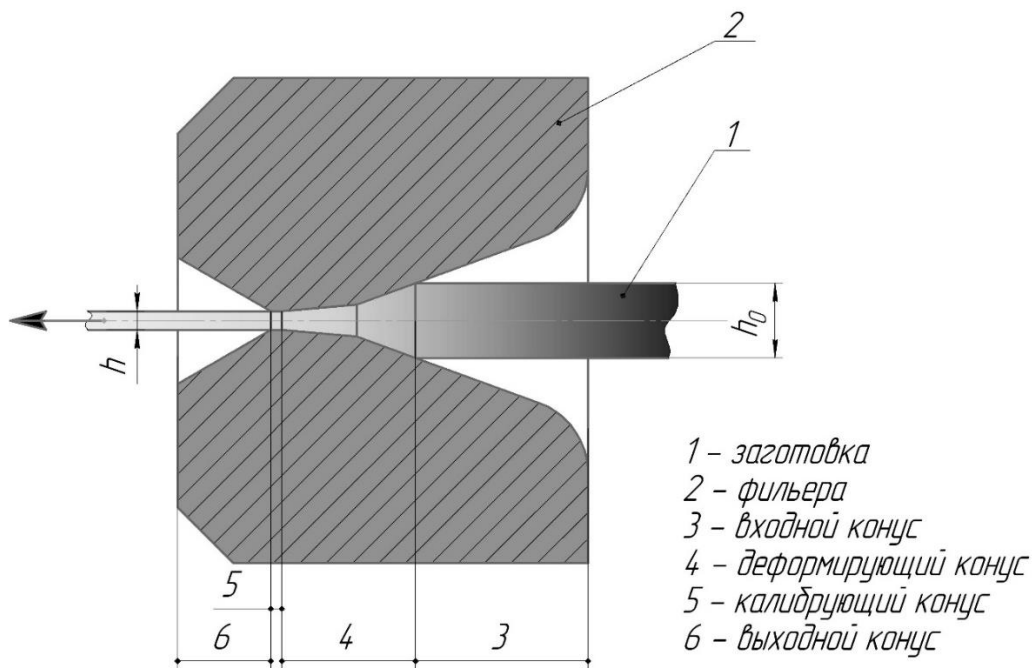


Рисунок 1. Схема процесса волочения

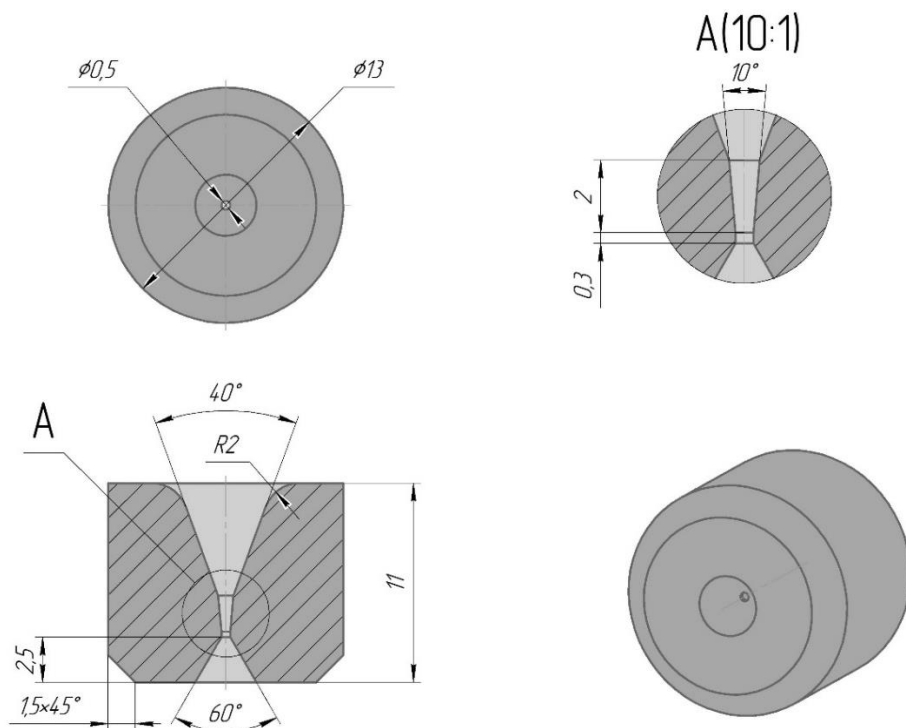


Рисунок 2. Пример конструкций фильеры

Так как внутреннее отверстие фильер подвержено значительному износу в процессе работы, особое внимание уделяется технологии ее производства. Фильера для проволоки

должна обладать высокими показателями точности, шероховатости, прочности, твёрдости и износостойкости. Для этих целей преимущественно используют твёрдые сплавы, в редких случаях - инструментальную сталь.

В настоящее время обработка отверстия таких изделий осуществляется на электроэрозионных станках с последующей обработкой шлифованием. Однако скорость резания все равно является недостаточной и требуется вводить дополнительную обработку притиром, что значительно увеличивает время обработки изделия [1,4,5].

Для повышения производительности обработки изделия при обеспечении требуемых параметров качества обрабатываемой поверхности необходимо прибегнуть к микрошлифовальной обработке, которая позволяет получать шероховатость до $Rz = 0,050 \dots 0,010$ мкм, точную форму с отклонением не более $0,1 - 2$ мкм, точное взаимное расположение в пределах $2 - 5$ мкм, отклонения от заданных размеров в пределах $1 - 3$ мкм [3]. В качестве режущего инструмента при данном методе обработки преимущественно используются алмазные шлифовальные головки разнообразной формы (рис. 3) [2].



Рисунок 3. Алмазные шлифовальные головки

Однако обработка микрошлифование таких изделий на обычном шлифовальном оборудовании невозможна, в связи с отсутствием серийно выпускаемых для таких целей станков. Например, для того чтобы обеспечить окружную скорость шлифовальной головки $25 - 35$ м/с с диаметром $1,6$ мм, необходимо иметь высокоскоростной шпиндель с частотой вращения порядка 400000 об/мин.

На основании вышесказанного **целью исследования** является разработка специального устройства, которое способно осуществить микрошлифовальную обработку поверхности отверстия твердосплавных фильер при обеспечении требуемых параметров качества получаемых изделий и дальнейшей проверки адекватности теоретических моделей полученных, а работах [6-11].

Разработка оборудования.

Для осуществления процесса микрошлифовальной обработки поверхностей отверстия твердосплавных фильер было спроектировано специальное устройство (рис. 4).

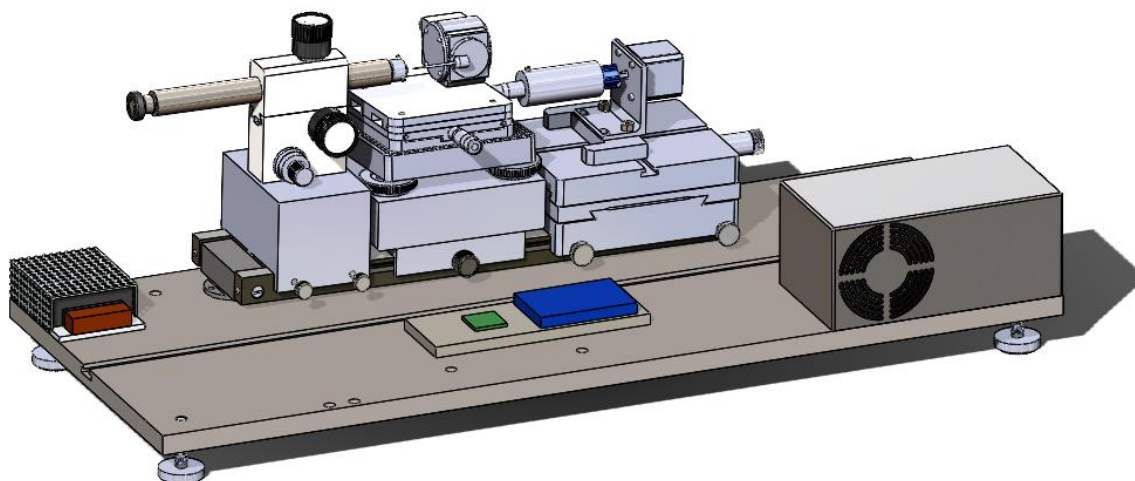


Рисунок 4. Устройство для микрошлифовальной обработки твердосплавных фильер

Спроектированное устройство снабжено высокоскоростным пневмоэлектрическим приводом вращения инструмента, обладает высокой жесткостью конструкции и снабжена электроприводом управления подачи на врезание, которая осуществляется шаговым электродвигателем.

Установка имеет следующие преимущества:

- простота конструкции;
- высокая скорость резания (до 35 м/с);
- высокая частота вращения инструмента (до 400000 об/мин);
- модульность системы;
- возможность перемещения инструмента в трёх плоскостях;
- наличие привода врезной подачи с дискретностью перемещения до 1 мкм;
- малые габариты.

Технические характеристики устройства приведены в табл. 1.

На рис. 5 показано устройство установки для микрошлифования.

Установка состоит из станины 1, на которую установлено основание установки 2, блок питания 6, блок управления 7 и программатор 8. К основанию 2 крепятся сменные модули: модуль «Задняя бабка» 3, модуль, модуль «Шлифовальная бабка» 4 и модуль «Механизм продольной подачи» 5.

В качестве привода вращения инструмента была доработана и использована бормашина пневматическая со встроенным компрессором БПК-02/01 (БПК-01М) (рис. 6).

Подобные устройства сейчас широко используются в стоматологии, однако также могут быть использованы в качестве приводов главного движения для микрошлифовальных станков. Благодаря такому решению, удалось значительно увеличить скорость вращения инструмента, которая необходима для осуществления процесса микрошлифования.

Таблица 1. Технические характеристики спроектированной установки

Параметр		Значение
Максимальная длина заготовки, мм		65
Максимальная ширина заготовки, мм		60
Максимальная высота заготовки, мм		35
Максимальная поперечная подача стола, мм		15
Максимальный вылет пиноли задней бабки, мм		50
Максимальная поперечная подача шпинделя, мм		15
Максимальная продольная подача шпинделя, мм		15
Максимальное вертикальное перемещение шпинделя, мм		10
Диапазон рабочих подач, мм/об		0,001...1
Скорость вращения инструмента, м/с		до 35
<i>Габариты установки</i>		
Длина, мм		840
Ширина, мм		340
Высота, мм		300
Масса, кг		116
<i>Электродвигатели</i>		
Пневмокомпрессор БПК-02/01 (БПК-01М)	Мощность, Вт	1000
	Напряжение питания, В	220
	Частота вращения инструмента, об/мин	до 400000
	Длина, мм	480
	Ширина, мм	300
	Высота, мм	920
	Масса, кг	20
Шаговый электродвигатель МРК244-01А	Тип двигателя	2-фазный
	Номинальный крутящий момент Н*м	0,26
	Регулирование частоты вращения	есть
	Реверс	есть
	Диаметр вала, мм	5
	Величина шага, град	1,8
	Минимальный программируемый шаг электродвигателя, мм	0,0001
	Рабочее напряжение, В/фаза	4
	Рабочий ток, А/фаза	1,2
	Длина, мм	59
	Ширина, мм	42
	Высота, мм	42
	Масса, кг	0,25

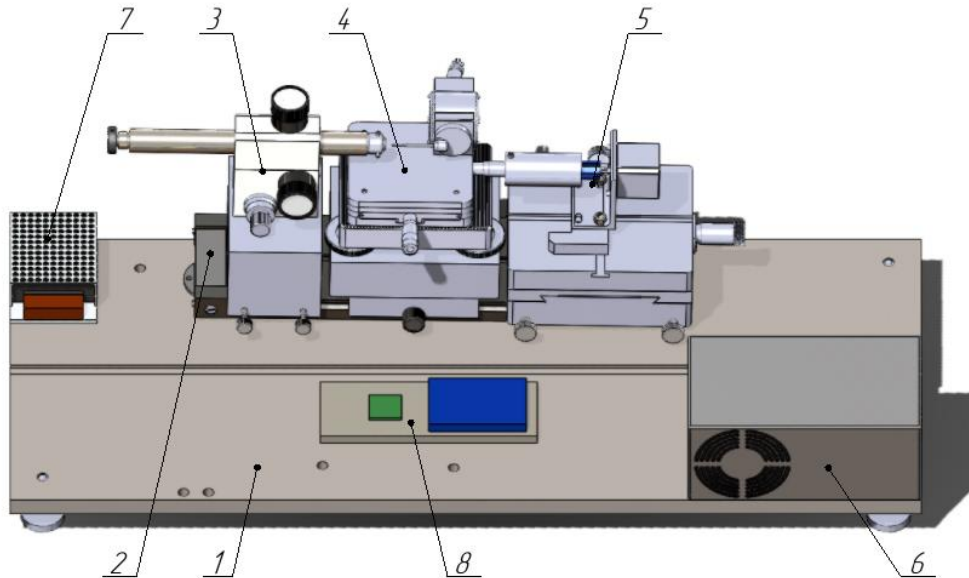


Рисунок 5. Устройство установки для микрошлифования



Рисунок 6. Общий вид пневмоэлектрического привода вращения инструмента

Описание сменных модулей.

Модуль «Задняя бабка» (рис. 7) крепится к основанию 2 установки при помощи винтов 9. Она состоит из основания задней бабки 10, стойки 11, пиноли задней бабки 12 и оправки 13. Оправка имеет возможность перемещаться в продольном направлении вращением барабана 14 с ценой деления 0,1 мм. Фиксация оправки осуществляется зажимами 15. Модуль служит для закрепления фильеры на оправке при помощи цангового зажима 16.

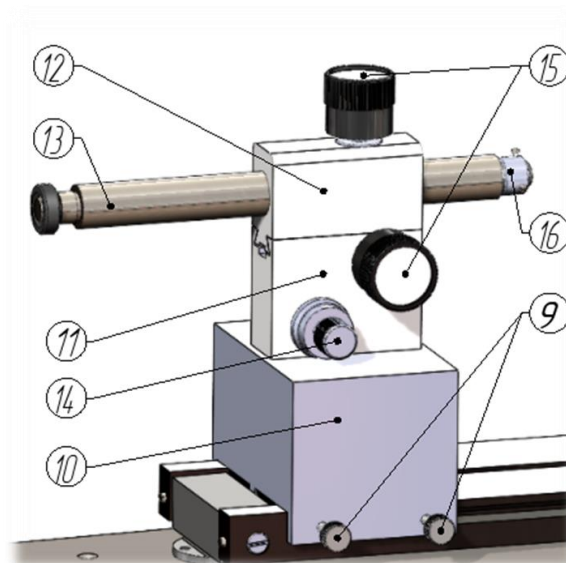


Рисунок 7. Модуль «Задняя бабка»

Модуль «Шлифовальная бабка» (рис. 8) крепится к основанию 2 установки при помощи винтов 17. Он состоит из основания подъемного механизма 18, подъемного механизма 19, который имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении вращением барабанов 20; каретки продольного и поперечного перемещения 21 и привода вращения инструмента 22 (шпиндель).

Продольное и поперечное перемещение каретки 21 необходимо для точной настройки положения инструмента – алмазной шлифовальной головки 32. Перемещение осуществляется за счет вращения рукояток 23.

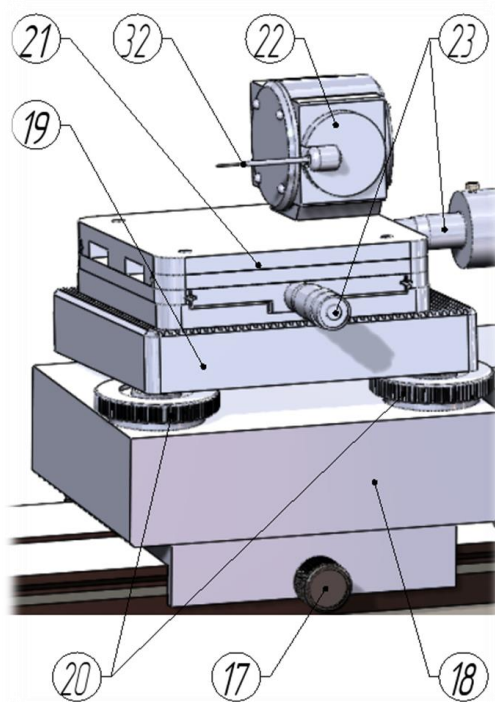


Рисунок 8. Модуль «Шлифовальная бабка»

Модуль «Механизм продольной подачи» (рис. 9) крепится к основанию 2 установки при помощи винтов 24. Он состоит из каретки продольного и поперечного перемещения привода 25, к которой через проставку 26 крепится привод продольной подачи. Он состоит из шагового электродвигателя 28, кронштейна 27 для крепления электродвигателя, муфты 29 и корпуса муфты 30. Крепление кронштейна 27 к поворотному столу 25 осуществляется винтами 32, имеющие прямоугольную головку. Муфта 29 установлена на валу электродвигателя и служит для передачи крутящего момента на рукоятку каретки продольного перемещения при помощи корпуса муфты 30. Фиксация корпуса муфты при этом осуществляется затяжкой винта 31.

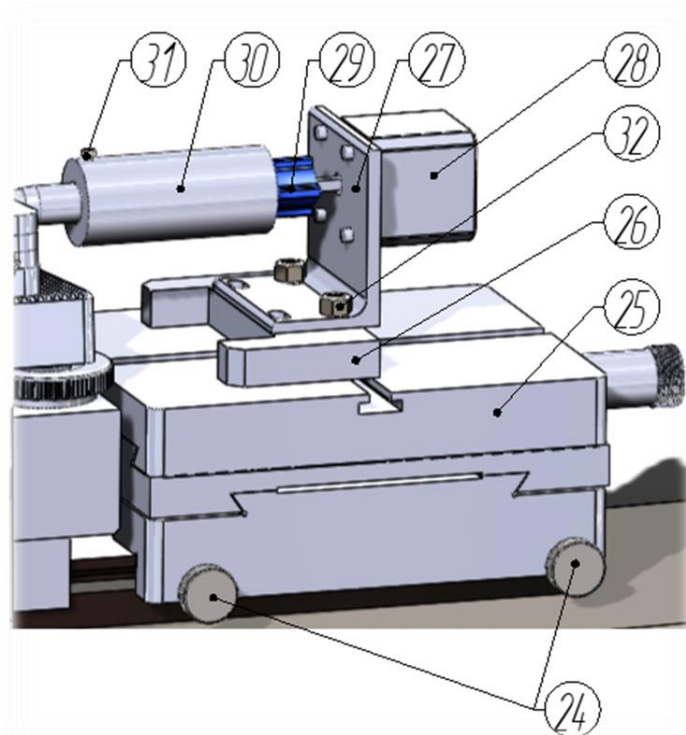


Рисунок 9. Модуль «Механизм продольной подачи»

Описание работы оборудования.

Устройство работает следующим образом. Фильера устанавливается в цанговый зажим 16 после чего производится настройка положения режущего инструмента относительно фильеры в вертикальном положении – поворотом барабанов 20, в продольном и поперечном – поворотом рукояток 23. После настройки положения инструмента, необходимо произвести настройку электрооборудования: подают питание на компрессор (на рисунке не показан) и блок питания 6; производят подключение блока управления 7 и программатора 8 к ПК, с помощью которого задают параметры для вращения шагового электродвигателя 28 и осуществления контролируемого процесса врезания инструмента в обрабатываемое отверстие фильеры. После этого производится обработка, при этом вращение инструмента осуществляется сжатым воздухом, нагнетаемый компрессором и передается при помощи гибкой связи. После завершения обработки, происходит отвод стола на ускоренной подаче в исходное положение, а установку отключают от питания в обратной последовательности.

Выводы

1. Разработано устройство для микрошлифовальной обработки твердосплавных фильер, отличающееся тем, что имеет простую конструкцию, высокую скорость резания, а также имеет модульную конструкцию для возможности проведения на его базе иных исследований в области микрошлифования.
2. В разработанной конструкции устройства доработан и использован высокоскоростной пневмоэлектрический привод вращения инструмента, позволяющий значительно увеличить скорость вращения инструмента (до 400000 об/мин при диаметре инструмента 1,6 мм), которая необходима для осуществления процесса микрошлифования.
3. Даны технические характеристики, описано устройство установки и составляющих, а также принцип ее работы.

Список литературы

1. Серебrenицкий, П. П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование : учебное пособие / П. П. Серебrenицкий. — 2-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2022.
2. Зубарев, Ю. М. Специальные методы обработки заготовок в машиностроении / Ю. М. Зубарев. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 400 с.
3. ГОСТ 9453-75 Волоки-заготовки из твердых спеченных сплавов для волочения проволоки и прутков круглого сечения : государственный стандарт союза ССР : дата введения – 01.01.1977 / Государственный комитет СССР по стандартам. – Изд. официальное. – Москва : Издательство стандартов, 1987 – 26 с.
4. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов / А.К. Байкалов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с.
5. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
6. Bratan Sergey, Sagova Zuzana, Sága Milan, Yakimovich Boris, Kuric Ivan. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding. Applied Sciences. 13. 3484. 2023. 10.3390/app13063484.
7. Bratan S.M. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls/ S.I. Roshchupkin, A.O. Kharchenko, S.V. Belousov.//CIS Iron and Steel Review, 2021, 22, pp. 26–31.
8. Братан С.М. Динамические модели процессов круглошлифовальной обработки / С.М.Братан , Е.А. Владецкая, А.О. Харченко //Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3 (77). – С. 138-148. DOI: 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.027 ISSN: 2658-364X.
9. Братан С.М. Влияние пластических деформаций на процесс удаления материала при чистовом шлифовании титановых сплавов/ С.М. Братан, А.С. Часовитина // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 4 (78). – С. 237-243. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.78.4.047 ISSN: 2658-364X.
10. Братан С.М. Моделирование влияния относительных вибраций инструмента и заготовки на съем материала при внутреннем шлифовании/С.М. Братан, А.С. Часовитина // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 9 (135). – С. 3-9.DOI: 10.30987/2223-4608-2022-9-3-9 ISSN: 2223-4608.
11. Братан С.М. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании/ С.М. Братан, А.С. Часовитина, С.И. Рошупкин, К. Гупта // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24. № 1. – С. 33-47. ISSN печатной версии: 1994-6309 ISSN печатной версии: 2073-7173.

УДК 621.9.048.4

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КЕРАМИК

С.Н. Григорьев¹,
М.А. Волосова¹,
С.В. Федоров¹

¹ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В статье описаны технологические принципы электроэрозионной обработки поверхностного слоя диэлектрической керамики SiAlON, основанные на создании искусственной проводимости поверхностного слоя керамического материала, что обеспечивает возможность формирования микротекстур в виде канавок и лунок. Установлено, что посредством нанесения на керамические пластины электропроводных покрытий и подачи мелкодисперсных ассистирующих порошков ZrO₂ и TiO₂ в рабочую диэлектрическую среду повышается устойчивость процесса искрообразования между электродом-инструментом и электродом-керамической пластиной. Проведенными стойкостными испытаниями показано, что использование в качестве покрытий соединений на основе твердых термостабильных нитридов тугоплавких металлов (AlCrTiNbSi)N и TiN-(AlCrTi)N с последующим микротекстурированием обеспечивает взаимоусиливающий эффект и позволяет повысить износоустойчивость керамических пластин до 2,6 раза при токарной обработке жаропрочного никелевого сплава Inconel 718.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, диэлектрическая керамика, микротекстуры, ассистирующий электрод.

APPLICATION OF ELECTRICAL DISCHARGE TREATMENT FOR SURFACE MODIFICATION OF DIELECTRIC CERAMICS

S.N. Grigoriev¹,
M.A. Volosova¹,
S.V. Fedorov¹

¹ Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The article presents ways to improve the efficiency of the process of flat face grinding by controlling the parameters of the contact zone of the cutting surface of the wheel with the part. To determine the area of contact between the cutting surface of the wheel and the part, 3D computer modeling was used, which showed that with an increase in the depth of processing, the productivity of the process will increase.

Keywords: electrical discharge machining, dielectric ceramics, microtextures, assisting electrode.

Введение

Вопросы текстурирования контактных быстроизнашивающихся поверхностей режущих инструментов, предназначенных для обработки изделий из труднообрабатываемых материалов, сегодня находятся в фокусе внимания ведущих исследовательских групп [1-3]. Текстурирование режущего инструмента представляет собой формирование на его поверхностях трехмерного специфического микрорельефа в виде различных вариаций канавок, лунок, выступов и др. Их функциональным назначением является снижение интенсивности процессов трения, адгезионного схватывания между сопряженными поверхностями, многократное повышение их износостойкости и ресурса работы в условиях действия повышенных термомеханических нагрузок [4-6].

Доказано, что основной эффект от микротекстурирования достигается за счет того, что сформированный микрорельеф способен обеспечивать значительное снижение фактической площади контакта инструмента с материалом обрабатываемой заготовки, а также служит в качестве микрорезервуаров для пластичных и твердых смазок, образующих антифрикционные пленки между контактирующими поверхностями [7,8].

Инструментальная керамика SiAlON сегодня является наиболее перспективным материалом для высокопроизводительной обработки жаропрочных хромоникелевых сплавов, являющихся базовыми материалами для изготовления деталей аэрокосмической, атомной и других отраслей промышленности (например, в современных газотурбинных двигателях объем никелевых сплавов составляет до 50 % общей массы) [8].

При резании никелевых сплавов керамические пластины испытывают крайне неблагоприятное сочетание нагрузок – высокие температуры и большие удельные давления на контактные поверхности, при которых резко интенсифицируются процессы изнашивания в виде активного лункообразования на передней поверхности, что увеличивает риск последующего хрупкого микроразрушения режущих кромок [9-11].

Поэтому применение новых подходов, направленных на снижение интенсивности процессов адгезионного схватывания и трения на контактных площадках и обеспечения повышенной износостойкости пластин из инструментальной керамики при резании никелевых сплавов сегодня является очень актуальным. На сегодняшний день перспективным и малоизученным направлением является микротекстурирование поверхности керамических пластин.

Основным методом микротекстурирования сегодня является применение пико- и фемтосекундной лазерной обработки [12-14]. Другим перспективным направлением является воздействие электрическими разрядами на поверхность керамики в процессе электроэрозионной обработки [15,16]. Преимуществом второго метода является возможность обеспечения более высокого качества обработанного поверхностного слоя, увеличение производительности и снижение себестоимости обработки в сравнении с технологиями, предусматривающим использованием дорогостоящих пико- и фемтосекундных лазерных комплексов [17,18]. Однако многие керамические материалы, в частности инструментальная керамика SiAlON, являются диэлектриками и для их обработки неэффективно применение традиционных принципов электроэрозионного воздействия, при которых поверхностный слой металлических изделий разрушается посредством пропускаемого через них электрических разрядов [1,9,15].

Целью настоящего исследования являлась разработка и апробация технологических принципов микротекстурирования рабочих поверхностей режущих пластин SiAlON методом электроэрозионной обработки.

2. Технологические принципы микротекстурирования керамических пластин посредством электроэрозионной обработки

Для решения проблемы и обеспечения возможности электроэрозионной обработки поверхностного слоя диэлектрической керамики SiAlON в настоящем исследовании реализован подход, основанный на создании искусственной проводимости поверхностного слоя керамического материала, что обеспечивает возможность микротекстурирования. Посредством нанесения на керамические пластины тонких электропроводных покрытий и подачи электропроводных ассистирующих порошков в рабочую диэлектрическую среду повышается устойчивость процесса искрообразования между электродом-инструментом и электродом-керамической пластиной.

На рисунке 1 проиллюстрирована сущность предложенных авторами принципов микротекстурирования пластин из диэлектрической керамики SiAlON.

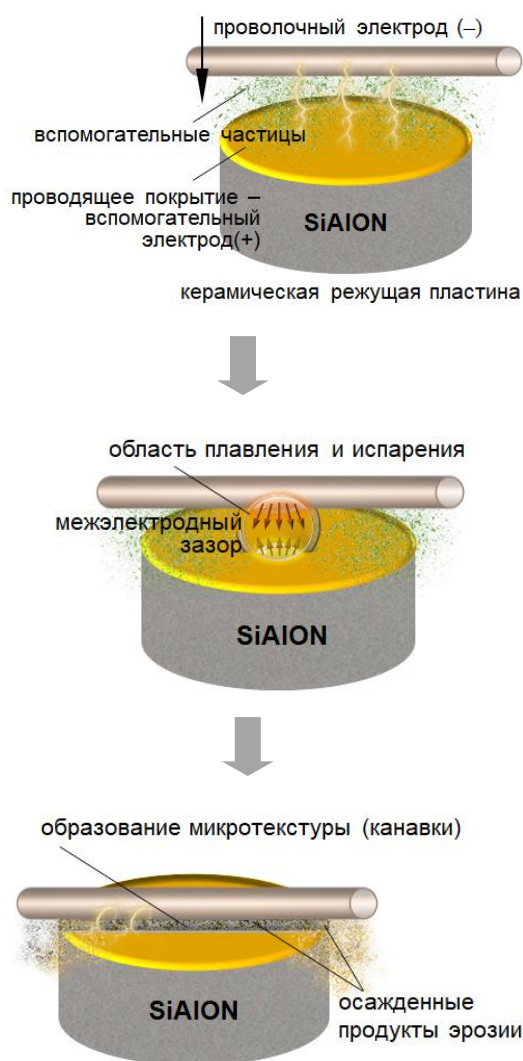


Рисунок 1. Основные стадии процесса микротекстурирования электрическими разрядами пластин из керамики SiAlON, основанные на создании искусственной проводимости диэлектрического материала

Создание искусственной проводимости диэлектрического материала осуществляется посредством нанесения электропроводных покрытий, выполняющих роль вспомогательного электрода, с которым взаимодействует в начальный момент обработки электрод-инструмент, в результате чего начинают отделяться электропроводные продукты эрозии. Их наличие в межэлектродном зазоре способствует созданию электрического разряда, который начинает выбивать микрочастицы материала с поверхности керамической пластины. Для повышения стабильности процесса искрообразования между электродом-инструментом и электродом-керамической пластиной дополнительно осуществляется подача ассистирующих электропроводных частиц в рабочую диэлектрическую жидкость. В качестве частиц, подаваемых в зону обработки, могут быть использованы суспензии из высокодисперсных и нанопорошков соединений типа ZnO, TiO₂, SnO и др.

В канале разряда под действием высоких температур из рабочей жидкости образуется газовый пузырь (рис. 1), внутри которого развивается мощный разряд, сопровождающийся ударной волной. После прорыва пузыря испаряемые продукты реакции, в том числе и электропроводящие, конденсируются на поверхности керамического образца, образуя новый вспомогательный электрод. Описанный процесс повторяется циклически и позволяет сформировать на поверхности требуемую микротекстуру, форма которой зависит от используемого электрода-инструмента.

В качестве электропроводных покрытий, предварительно формируемых на поверхности керамических пластин, впоследствии выполняющих роль вспомогательного электрода, предлагается использовать соединения на основе твердых термостабильных нитридов тугоплавких металлов типа (TiAl)N, (AlCrTi)N и др. [19,20]. Нанесение подобных покрытий с последующим микротекстурированием потенциально может обеспечить взаимоусиливающий эффект и должно повысить износостойчивость керамических пластин при обработке жаропрочных никелевых сплавов на повышенных скоростях резания и подачах.

3. Экспериментальные образцы и методика проведения экспериментальных исследований

В качестве керамических режущих пластин использовались образцы круглой формы RNGN-190800 (ISO standard). Пластины имели диаметр 15.9 мм и толщину 7.938 мм и были изготовлены из спеченной инструментальной керамики на основе SiAlON. Фазовый состав используемой керамики (об.%): Si₅AlON₇ – 79%, Si₃N₄ – 17%, Yb₂O₃ – 4%. Керамические пластины после выполнения микротекстурирования закреплялись в токарной державке CRSNR 3232P19 и использовались для стойкостных испытаний на металлообрабатывающем станке Jesco Machinery 1650ENC с ЧПУ при продольном точении заготовок в виде цилиндрического прутка диаметром 100 мм из никелевого сплава Inconel 718 (предел прочности – 1180 МПа, твердость – 360 НВ). Испытания выполнялись при следующих режимах резания – скорость резания 360 м/мин, подача 0.25 мм/об, глубина резания 1.0 мм. В процессе резания использовалась пластичная смазка Grease HighSpeed EP 3. Через каждые 2 мин процесс резания останавливался и выполнялась количественная оценка фаски износа на задней поверхности пластин посредством измерений на оптическом микроскопе StereoDiscovery.

В соответствии с разработанными технологическими принципами вблизи режущей кромки керамических пластин осуществлялось формирование двух вариантов микротекстур в виде микроканалов и микролунок (рис. 2).

Первый вариант. Прорезку продольных микроканалов, каждая из которых имеет ширину 0.156 мм, глубину 0.025 мм с межосевым шагом 0.3 мм выполняли универсальным электродом-инструментом из латунной проволоки диаметром 0.25 мм, верхняя и нижняя направляющие которого программно обеспечивают его перемещение в рабочем пространстве

станка. В качестве рабочей среды использовалась деионизированная вода, в которую для повышения устойчивости искрообразования дополнительно вводили мелкодисперсные частицы диоксида титана с концентрацией 150 г/л. Микроканавки формировали на проволочно-вырезном электроэрозионном станке GF Agie Charmilles CUT 30 P. В процессе формирования микроканавок керамическая пластина размещалась в специальном поворотном приспособлении (рис. 3).

Перед микротекстурированием на керамические пластины посредством магнетронного вакуумно-плазменного осаждения наносилось износостойкое электропроводное покрытие (AlCrTiNbSi)N толщиной 5 мкм. Микротекстурирование продольных канавок выполнялось при силе рабочего тока 1.0 А, частоте импульсов тока 20 кГц, рабочем напряжении 108 В, межэлектродном зазоре 0.005–0.006 мм и натяжении проволоки 0.3 Н.

Второй вариант. Прошивку микролунок, каждая из которых имеет диаметр 0.07 мм, глубину 0.045 мм с межосевым шагом 0.08 мм выполняли электродом-инструментом в виде вольфрамового стержня. В качестве рабочей среды использовалась деионизированная вода, в которую для повышения устойчивости процесса искрообразования дополнительно вводили мелкодисперсные частицы диоксида циркония с концентрацией 50 г/л. Микролунок формировали на прошивном электроэрозионном станке GF AgieCharmilles FORM P 350.

Перед микротекстурированием на керамические пластины посредством вакуумно-плазменного электродугового осаждения наносилось двухслойное износостойкое электропроводное покрытие TiN-(AlCrTi)N толщиной 5 мкм. Микротекстурирование лунок выполнялось при силе рабочего тока 0.3 А, частоте импульсов тока 10 кГц, рабочем напряжении 108 В и межэлектродном зазоре 0.005–0.006 мм.



Рисунок 2. Варианты микротекстур в виде микроканавок (а) и микролунок (б), сформированных на передней поверхности круглых керамических пластин из SiAlON, посредством обработки импульсными электрическими разрядами

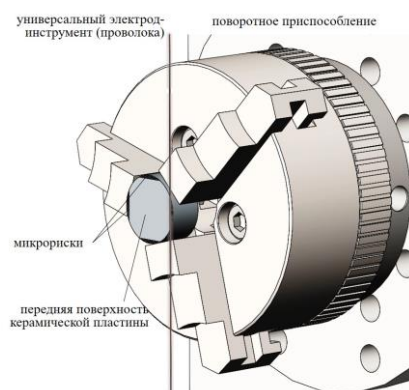


Рисунок 3. Схема прорезки проволочным электродом микроканавок на передней поверхности керамической пластины, размещенной в поворотном приспособлении проволочно-вырезного электроэрозионного станка

4. Результаты экспериментальных исследований

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики (производительность съема материала P , шероховатость текстурированной поверхности Ra и время обработки четырех граней пластины T) для двух вариантов микротекстурирования пластин из диэлектрической керамики SiAlON посредством обработки импульсными электрическими разрядами.

Первый вариант формирования микротекстур посредством электроэрозионной прорезки электродом-инструментом из латунной проволоки продольных микроканалов, формируемых в деионизированной воде с добавками ассистирующих мелкодисперсных частиц TiO_2 совместно с предварительно сформированным на керамической пластине ассистирующим электропроводным покрытием $(AlCrTiNbSi)N$, в сравнении со вторым вариантом, предусматривающим электроэрозионную прошивку микролунок вольфрамовым стержнем с добавками ассистирующих мелкодисперсных частиц ZrO_2 и ассистирующим покрытием $TiN-(AlCrTi)N$, обеспечивает увеличение скорости съема материала в 2.5 раза, снижение шероховатости текстурированной поверхности в 1.7 раза и снижение времени электроэрозионной обработки керамической пластины на 30%.

Таблица 1. Условия и выходные показатели двух вариантов микротекстурирования электрическими разрядами режущих пластин из керамики SiAlON

Варианты микротекстурирования				Выходные показатели		
вид микротекстуры	электрод-инструмент	ассистирующий электрод (покрытие)	ассистирующие частицы	P (mm^3/c)	Ra ($мкм$)	T (мин)
микроканалы	латунная проволока	$(AlCrTiNbSi)N$	TiO_2 (150 г/л рабочей жидкости)	0,0084	0,9	7
микролуны	вольфрамовый стержень	$TiN-(AlCrTi)N$	ZrO_2 (50 г/л рабочей жидкости)	0,0033	1,6	10

На рисунке 4 представлены результаты сравнительных стойкостных испытаний при тчении сплава Inconel 718 круглыми режущими пластинами из диэлектрической керамики SiAlON, прошедшими два исследуемых варианта микротекстурирования посредством электроэрозионной обработки. На рисунке 5 представлены оптические изображения очагов

износа на задних поверхностях различных пластин из SiAlON после 10 мин испытаний при точении сплава Inconel 718 со скоростью резания 360 м/мин, подачи 0.25 мм/об, глубиной резания 1.0 мм со смазкой Grease HighSpeed EP 3 на передней поверхности пластин.

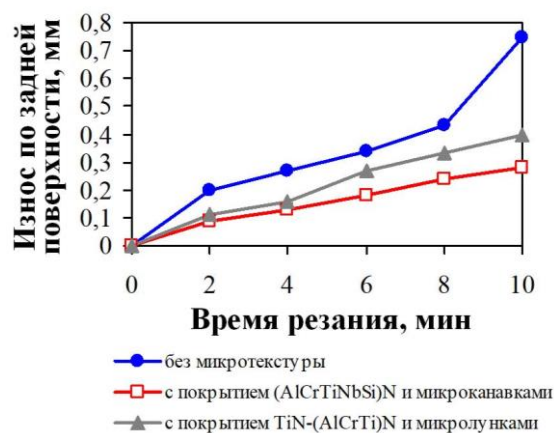


Рисунок 4. Зависимости износа по задней поверхности режущих пластин из керамики SiAlON с различными вариантами микротекстур от времени резания при точении сплава Inconel 718

Установлено, что микротекстурирование заметно повышает износоустойчивость керамических пластин из SiAlON при резании никелевого сплава Inconel 718. Однако эффект от применения двух исследованных вариантов микротекстур отличается. Использование керамической пластины с покрытием (AlCrTiNbSi)N и текстурой в виде продольных микроканавок, в которой размещена пластичная смазка Grease HighSpeed EP 3, блокирует процесс лункообразования на передней поверхности и сдерживает развитие очага износа на задней поверхности. После 10 минут стойкостных испытаний ширина площадки износа на задней поверхности для пластин без микротекстурирования составила 0.75 мм, для пластин с текстурами в виде микролунок – 0.4 мм, а для пластин с микроканавками – 0.28 мм.

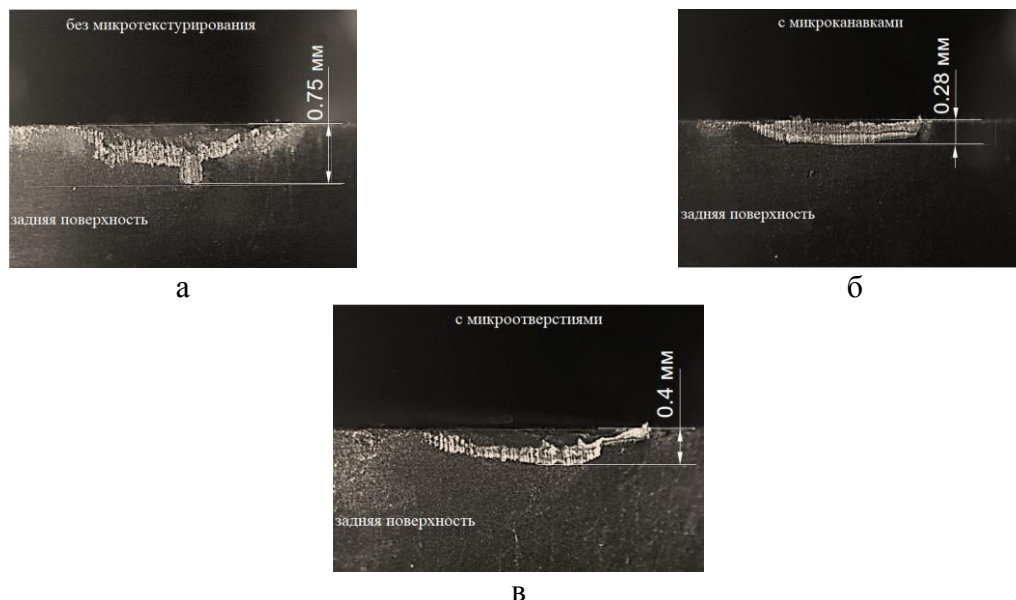


Рисунок 5. Оптические изображения очагов износа режущих пластин из керамики SiAlON без микротекстурирования (а), с микроканавками и покрытием (AlCrTiNbSi)N (б), с микролунками и покрытием TiN-(AlCrTi)N (в) после 10 мин точения сплава Inconel 718

Выводы

Предложенные принципы микротекстурирования, основанные на создании искусственной проводимости диэлектрического материала посредством нанесения на керамические пластины электропроводных покрытий и повышения устойчивости процесса искрообразования между электродом-инструментом и электродом-керамической пластиной путем подачи электропроводных ассистирующих порошков в рабочую диэлектрическую среду, позволяют осуществлять с помощью электроэрозионной обработки формирование микротекстур в виде канавок и лунок на поверхности диэлектрической керамики SiAlON.

Формирование микротекстур на поверхности режущих пластин из диэлектрической керамики SiAlON электроэрозионной обработкой посредством прорезки электродом-инструментом из латунной проволоки продольных микроканавок, формируемых при добавлении в рабочую жидкость частиц TiO_2 совместно с предварительно сформированным на керамической пластине покрытием $(AlCrTiNbSi)N$, обеспечивает скорость съема материала $0.0084 \text{ мм}^3/\text{с}$, шероховатость текстурированной поверхности 0.9 мкм и время электроэрозионной обработки одной пластины 7 мин (при формировании текстур на четырех гранях). Указанные показатели превосходят достигаемые альтернативным вариантом микротекстурирования, предусматривающим формирование вольфрамовым стержнем на керамических пластинах с покрытием $TiN-(AlCrTi)N$ микролунок при добавлении в рабочую жидкость ассистирующих частиц ZrO_2 , что обеспечивает скорость съема $0.0033 \text{ мм}^3/\text{с}$, шероховатость поверхности 1.6 мкм и время электроэрозионной обработки 10 мин.

Использование керамических пластин из SiAlON с покрытием $(AlCrTiNbSi)N$ и текстурой в виде продольных микроканавок, в которых размещена пластичная смазка, блокирует процесс лункообразования на передней поверхности и сдерживает развитие очага износа на задней поверхности, обеспечивая повышение износоустойчивости режущих граней пластин при точении сплава Inconel 718 в 2.6 раза в сравнении с пластинами без микротекстур и в 1.4 раза в сравнении с пластинами, имеющими текстуру в виде микролунок.

Настоящие исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках задания в сфере научной деятельности (проект № FSFS-2021-0003). При проведении работ было задействовано оборудование Центра коллективного пользования (ЦКП) Станкин (проект Министерства высшего образования РФ 075-15-2021-695).

Список литературы

1. Electrical discharge machining of ceramic nanocomposites: sublimation phenomena and adaptive control / S. N. Grigoriev, M. P. Kozochkin, A. N. Porvatov [et al.] // Heliyon. – 2019. – Vol. 5(10). – 02629.
2. Novel Environmentally Friendly Manufacturing Method for MicroTextured Cutting Tools / C. Li, X. Qiu, Z. Yu [et al.] // Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol. – 2020. – Vol. 8. – P. 193–204.
3. Tool texturing for micro-turning applications – an approach using mechanical micro indentation / J.V. Elias, N.P. Venkatesh, K. Lawrence [et al.] // Mater. Manuf. Process. – 2020. – Vol. 36. – P. 84–93.
4. Abdel-Aal, H.A. Functional surfaces for tribological applications: inspiration and design // H.A. Abdel-Aal // Surf. Topogr. Metrol. Prop. – 2016. – Vol. 4. – 043001.
5. Additive surface texturing of cutting tools using pulsed laser implantation with hard ceramic particles / S. Böhm, A. Ahsan, J. Kröger [et al.] // Prod. Eng. – 2020. – Vol. 14. – P. 733–742.

6. DLC-coating Application to Improve the Durability of Ceramic Tools / S. Grigoriev, M. Volosova, S. Fyodorov [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2019. – Vol.28 (7). – P. 4415-4426.
7. Numerical analysis of performance of different micro-grooved tools for cutting titanium alloy Ti-6Al-4V / X. Miao, X. Zhang, X. Liu [et al.]// *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2020. – Vol. 111. – P. 1037–1054.
8. Development of DLC- coated solid sialon/tin ceramic end mills for nickel alloy machining: Problems and prospects / S.N. Grigoriev, M.A. Volosova, S.V. Fedorov [et al.]// *Coatings*. – 2021. – Vol. 11 (5). – 532.
9. Kumar, C.S. Effect of WEDM surface texturing on Al₂O₃/TiCN composite ceramic tools in dry cutting of hardened steel / C.S. Kumar,S.K. Patel// *Ceram. Int.* – 2018. – Vol. 44. – P. 2510–2523.
10. The role of thin-film vacuum-plasma coatings and their influence on the efficiency of ceramic cutting inserts / M. Volosova, S. Grigoriev, A. Metel [et al.]// *Coatings*. – 2018. – Vol. 8 (8). – 287.
11. Properties of (Cr,Al,Si)N-(DLC-Si) composite coatings deposited on a cutting ceramic substrate / S.N. Grigoriev, M.A. Volosova, A.A. Vereschaka [et al.] // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46 (11). – P. 18241-18255. – Part A.
12. Investigation of micro-textured cutting tools used for face turning of alloy 718 with high-pressure cooling/ N.T. Alagan, P. Zeman, P. Hoier [et al.] // *J. Manuf. Process.* – 2019. – Vol. 37. – P. 606–616.
13. Structured and textured cutting tool surfaces for machining applications / T. Özel, D. Biermann, T. Enomoto [et al.]// *CIRP Ann.* – 2021. – Vol. 70. – P. 495–518.
14. Nano-scale multi-layered coatings for improved efficiency of ceramic cutting tools / A.A. Vereschaka, S.N. Grigoriev, M.A. Volosova [et al.]// *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 90 (1-4). – P. 27-43.
15. State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications / H. Marashi, D.M. Jafarlou, A.A. Sarhan [et al.]// *Precis. Eng.* -2016. – Vol. 46. – P. 11–33.
16. Influence of geometry and the sequence of surface texturing process on tribological properties / M. Sedlaček, B. Podgornik, A. Ramalho [et al.] // *Tribol. Int.* – 2017. – Vol. 115. – P. 268–273.
17. Performance of femtosecond laser-textured cutting tools deposited with WS₂ solid lubricant coatings /J. Deng, Y. Lian, Z. Wu [et al.]// *Surf. Coat. Technol.* – 2013. – Vol. 222. – P. 135–143.
18. A Review of Surface Texturing in Internal Combustion Engine Piston Assembly/ M.A.M. Azmi, W.M.F.W. Mahmood, J.A. Ghani [et al.]// *Int. J. Integr. Eng.* – 2020. – Vol. 12. – P. 146–163.
19. Investigation of multicomponent nanolayer coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al / S. Grigoriev, A. Vereschaka, F. Milovich [et al.]// *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol.401. –126258.
20. Specific features of the structure and properties of arc-PVD coatings depending on the spatial arrangement of the sample in the chamber / S. Grigoriev, A. Vereschaka, V. Zelenkov [et al.] // *Vacuum*. –2022. – Vol. 200. – 111047.

УДК 621.771.013

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

**Ю.А. Фисоченко¹,
А.Г. Колесов¹**

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена системному анализу процесса фрезерования деталей на станках с ЧПУ. Представлена декомпозиция системы, а также выделены 3 подсистемы процесса фрезерования.

Для каждой из подсистем определены входные, выходные параметры и состояние подсистемы, а также установлены взаимосвязи между ними. Предложена система уравнений, описывающая поведение подсистем, участвующих в технологической операции.

Ключевые слова: фрезерование, декомпозиция системы, подсистемы процесса.

CNC MILLING PROCESS SYSTEM ANALYSIS

**Ju.A. Fisochenko¹,
A.G. Kolesov¹**

¹FSFAEI HE «Sevastopol state university», Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The process is article dedicated to CNC milling process system analysis. The system decomposition is represented, as well as 3 subsystems are defined.

Input output and state parameters are determined for each subsystem, alongside with interconnection in between. Equations system, describing the subsystem's participating in technological operation conduct.

Keywords: milling, roughness decomposition of the system, process subsystems.

Многолезвийные инструменты, такие как фрезы, развертки, метчики по форме зубьев могут Фрезерование — это процесс механической обработки материала, осуществляемый воздействием вращающегося режущего инструмента (фрезы) при одновременной линейной подаче заготовки.

На данный момент времени фрезерование является одним из наиболее используемых методов производства металлических изделий. Номенклатура материалов, подвергаемых фрезерной обработке, варьируется от листового металла до объемных заготовок. Операция фрезерования является достаточно точной (Ra 0.8), однако не исключено возникновение дефектов обрабатываемой поверхности.

Для снижения числа бракованных изделий, а также для повышения параметров качества деталей необходимо установить зависимости между входными и выходными параметрами технологической системы с помощью системного анализа [1-5].

На рисунке 1 представлена схема связей между подсистемами операции фрезерования с показанными входными и выходными переменными.

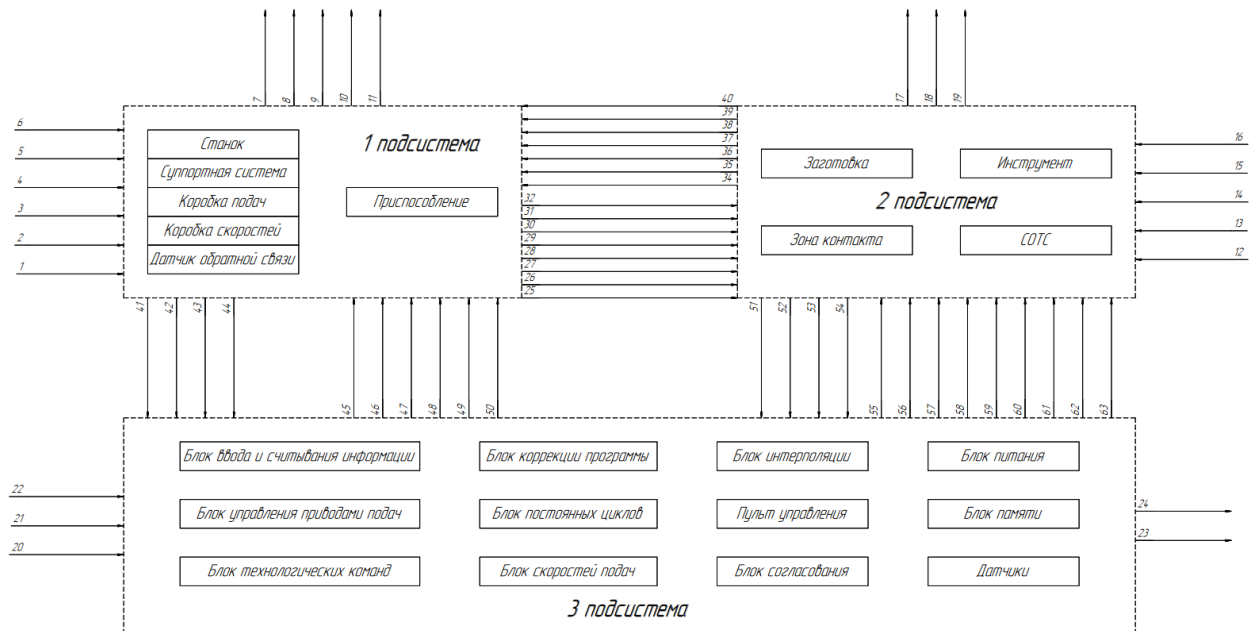


Рисунок 1. Схема связей между подсистемами операции фрезерования

Перечень входных и выходных параметров, а также состояние системы (влияние) показано в таблице 1.

Таблица 1. Описание подсистем операции фрезерования

Входящие параметры	Состояние подсистемы (влияние)	Выходные переменные
От ОС в 1 подсистему 1. Начальные технические данные станка, приспособления 2. Начальная температура узлов станка 3. Динамическая устойчивость подсистемы 4. Начальное пространственное положение узлов и механизмов 5. Тепловая устойчивость подсистемы 6. Начальная наладка подсистемы	- Текущие технические данные станка, приспособления - Текущие характеристики пространственного положения узлов и деталей - Текущая температура системы - Потребление энергетических ресурсов - Текущие процессы в подсистеме - Перегрев подсистемы из-за высокой температуры	В ОС от 1 подсистемы 7. Тепловые потоки в среду 8. Расход ресурсов 9. Изменение состояния устойчивости станка с выработкой вибрационных колебаний 10. Износ узлов и деталей станка 11. Пространственное изменение положения конструктивных элементов и узлов станка в процессе работы
От ОС во 2 подсистему 12. Начальные параметры геометрии, физико-механические свойства обрабатываемого материала	- Текущая температура составляющих - Перегрев подсистемы - Текущая форма, размеры составляющих подсистемы - Текущее состояние	В ОС от 2 подсистемы 17. Тепловые и охлаждающие потоки 18. Размеры, форма, химико-физические показатели составляющих

Входящие параметры	Состояние подсистемы (влияние)	Выходные переменные
13. Начальная температура детали 14. Начальный состав и свойства СОТС 15. Начальная температура СОТС 16. Начальное положение узлов и механизмов 2 подсистемы	подсистемы во время работы • Текущие характеристики составляющих • Степень загрязнения СОТС	19. Пространственное положение подсистемы
От ОС в 3 подсистему 20. Характеристика и тип ЧПУ 21. Характеристика и тип датчика 22. Обеспечение питания необходимыми постоянными напряжениями и токами всех блоков ЧПУ от обычной трехфазной сети	• Контроль параметров фрезерования • Управление определенными органами и узлами 1 и 2 подсистемы	В ОС от 3 подсистемы 23. Передача сигналов элементам подсистемы 24. Расход электроэнергии
От 1 подсистемы во 2 подсистему 25. Изменение пространственного положения элементов подсистемы 26. Изменение режимов работы 2 подсистемы 27. Влияние действующих сил в 1 подсистеме 28. Тепловые потоки 29. Действия вибрационных колебаний 30. Влияние возникающих сил 31. Изменение пространственного положения 2 подсистемы 32. Изменение пространственных деформаций	• Влияние тепловых и охлаждающих потоков • Влияние вибрационных колебаний • Влияние действующих сил в 1 подсистеме • Изменение пространственного положения элементов 2 подсистемы • Изменение геометрии, физико-механических свойств 2 подсистемы • Перегрев системы • Выход из строя механизмов 1 подсистемы • Снижение КПД подсистемы • Полный отказ 1 подсистемы	В 1 подсистему от 2 подсистемы 33. Тепловые и охлаждающие потоки 34. Влияние возникающих сил 35. Действия вибрационных колебаний 36. Реакции СОТС 37. Силы реакции инструмента 38. Тепловой поток от заготовки и инструмента 39. Влияние тепловых и охлаждающих сил 40. Управление пространственной деформации
От 1 подсистемы в 3 подсистему 41. Запрос сигнала на	• Пространственное положение органов подсистемы	В 1 подсистему от 3 подсистемы 45. Задание

Входящие параметры	Состояние подсистемы (влияние)	Выходные переменные
изменение узлов 42. Запрос необходимых данных для ДОС (датчиков обратной связи) 43. Получение данных для блока технологических команд 44. Получение необходимых данных о начальных и текущих положениях узлов	• Управление параметрами подсистемы • Отключение подсистемы при перегреве • Управление элементами подсистемы • Механические характеристики в текущий момент времени	координатного перемещения органов подсистемы 46. Передача команд по управлению осями 47. Управление механизмами 1 подсистемы 48. Изменение пространственного положения узлов 49. Изменение скорости работы 1 подсистемы 50. Получение сигналов обратной связи о положении и скоростях осей
От 2 подсистемы в 3 подсистему 51. Запрос сигнала на смену инструмента 52. Запрос команды для подачи потоков СОТС 53. Получение необходимых данных для блока технологических команд 54. Получение необходимых данных о начальных и текущих положениях узлов	• Пространственное положение органов подсистемы • Управление параметрами подсистемы • Отключение подсистемы при перегреве • Управление отдельными элементами подсистемы • Изменение пространственного положения составляющих	Во 2 подсистему от 3 подсистемы 55. Задание координатного перемещения органов подсистемы 56. Управление механическими, физическими процессами 57. Управление механизмами 2 подсистемы 58. Изменение пространственного положения составляющих 59. Изменение геометрии элементов подсистемы 60. Передача команд по управлению осями 61. Изменение скорости работы 2 подсистемы 62. Получение команды для подачи потоков СОТС 63. Получение команды для смены инструмента

Поведение подсистем, участвующих в технологической операции, может быть представлено системой уравнений, характеризующей состояние технической системы.

Где Z_1 – 1 подсистема (станок, приспособление).

Z_2 – 2 подсистема (заготовка, инструмент, зона контакта, СОТС).

Z_3 – 3 подсистема (блок ввода и считывания информации, блок технологических команд, блок управления приводами подач, блок коррекции программы, блок скоростей подач, блок постоянных циклов, блок интерполяции, пульт управления, блок согласования, блок питания, блок питания, блок памяти, датчики).

X_1 – вектор входных переменных 1 подсистемы, поступающих из окружающей среды.

X_2 – вектор входных переменных 2 подсистемы, поступающих из окружающей среды.

X_3 – вектор входных переменных 3 подсистемы, поступающих из окружающей среды.

X_1^* – вектор выходных переменных поступающих в окружающую среду из 1 подсистемы.

X_2^* – вектор выходных переменных поступающих в окружающую среду из 3 подсистемы.

X_3^* – вектор выходных переменных поступающих в окружающую среду из 3 подсистемы.

Y_1 – вектор входных переменных 1 подсистемы поступающих из других подсистем.

Y_2 – вектор входных переменных 2 подсистемы поступающих из других подсистем.

Y_3 – вектор входных переменных 3 подсистемы поступающих из других подсистем.

Φ_1 – функционал, отображающий множество входных переменных и параметров исходного состояния на множество параметров состояния 1 подсистемы в момент времени t .

Φ_2 – функционал, отображающий множество входных переменных и параметров исходного состояния на множество параметров состояния 2 подсистемы в момент времени t .

Φ_3 – функционал, отображающий множество входных переменных и параметров исходного состояния на множество параметров состояния 3 подсистемы в момент времени t .

F_1 – функционал, отображающий множество значений входных переменных и параметров исходного состояния на множество выходных переменных 1 подсистемы.

F_2 – функционал, отображающий множество значений входных переменных и параметров исходного состояния на множество выходных переменных 2 подсистемы.

F_3 – функционал, отображающий множество значений входных переменных и параметров исходного состояния на множество выходных переменных 3 подсистемы.

t – момент времени.

$$Z_1 = \Phi_1(X_1, Y_2, Y_3, t);$$

$$Z_2 = \Phi_2(X_2, Y_1, Y_3, t);$$

$$Z_3 = \Phi_3(X_3, Y_1, Y_2, t);$$

$$Y_1 = \Phi_1(Z_1, X_1^*, t);$$

$$Y_2 = \Phi_2(Z_2, X_2^*, t);$$

$$Y_3 = \Phi_3(Z_3, X_3^*, t).$$

Большая часть исследований, выполненных в области фрезерования, укладывается в рамки рассмотренных функционалов. Изучение особенностей формирования показателей качества обрабатываемых поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ предполагает исследование влияния на процесс режимов обработки, материала режущей части инструмента, состава СОТС, жесткости технологической системы, стратегий обработки. Исследование формирования показателей качества – комплексная задача, соответственно, одной из важнейших задач является установление закономерностей между входными и выходными

параметрами, а также состоянием подсистем для минимизации числа бракованных изделий и повышения качества обработки.

Список литературы

1. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Основы системного анализа: учебник. – 2-е изд., доп. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 396 с.
2. Кориков А.М., Сафьянова Е.Н. Основы системного анализа и теории систем: учебное пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989. – 207 с.
3. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2009. – 343 с.
4. Волкова В. Н. Основы теории систем и системный анализ. М.: Издательство Юраст, 2012.
5. Перегудов Ф. И. Введение в системный анализ. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1989. 9. Системный анализ и принятие решений: словарь-справочник. Под редакцией В. Н. Волковой, М.: Высшая школа, 2004.

УДК 621.7

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОФРЕЗЕРОВАНИЯ И СРОКА СЛУЖБЫ МИКРОКОНЦЕВЫХ ФРЕЗ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ БЫСТРЫМИ АТОМАМИ И ОСАЖДЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

*А.С. Метель¹,
Ю.А. Мельник¹,
М.А. Волосова¹,
Э.С. Мустафаев¹*

¹ *ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская федерация*

АННОТАЦИЯ

Микрофрезерование широко используется для изготовления микроканалов в электронике, биологической, химической и других областях. Недостатками этого метода являются заусенцы и шероховатая поверхность боковых стенок и дна микроканала. В данном исследовании микрофрезерование прямоугольных бронзовых микроканалов осуществлялось твердосплавными концевыми фрезами диаметром 1 мм, подвергнутыми обработке быстрыми атомами аргона и нанесению износостойкого покрытия TiB₂. Исследовали качество поверхности микроканалов, т.е. размер заусенцев и шероховатость поверхности. Показано, что заметное уменьшение радиуса режущей кромки микроконцевой фрезы за счет обработки быстрыми атомами аргона позволяет нанести покрытие TiB₂ толщиной 3 мкм без достижения порога размерного эффекта, что существенно улучшает обрабатываемость.

Ключевые слова: микрофрезерование; шероховатость поверхности; заусенцы; травление; быстрые атомы аргона.

INCREASING THE EFFICIENCY OF MICRO-MILLING AND THE SERVICE LIFE OF MICRO END MILLS AS A RESULT OF PROCESSING WITH FAST ATOMS AND DEPOSITION OF WEAR-RESISTANT COATINGS

A.S. Metel¹,
Y.A. Melnik¹,
M.A. Volosova¹,
E.S. Mustafaev¹

¹ Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Micro-milling is widely used for fabrication of microchannels in electronics, biological, chemical, and other areas. Drawbacks of this method are burr formations and rough surfaces of microchannel sidewalls and bottom. In this study, micro-milling of rectangular bronze microchannels was carried out using 1 mm diameter tungsten carbide end mills subjected to processing with fast argon atoms and deposition of wear-resistant TiB₂ coating. Surface quality of microchannels, i.e., burr size and surface roughness, was studied. It was shown that an appreciable decrease in cutting edge radius of the micro end mill due to processing with fast argon atoms allows deposition of 3-μm-thick TiB₂ coating without reaching the threshold of size effect, thus substantially improving the machining capability.

Keywords: micro-milling; surface roughness; burrs; etching; fast argon atoms.

Введение

Для увеличения срока службы микроконцевых фрез и улучшения их рабочих характеристик на них наносят износостойкие покрытия [1]. Чем толще покрытие, тем дольше срок его службы. Однако нанесение износостойкого покрытия увеличивает радиус режущей кромки. Для инструментов с радиусом режущей кромки более 10 мкм вполне приемлема толщина покрытия 5 мкм. Совсем иначе обстоит дело в случае микроинструмента с радиусом режущей кромки менее 5 мкм. При микрофрезеровании параметры обработки снижаются до уровня нескольких микрон, а толщина стружки сравнима с радиусом режущей кромки микроконцевой фрезы, и это оказывает значительное влияние на процесс резания и качество обработки [2].

Износостойкие покрытия, которые могут заметно повысить производительность обработки твердосплавными микроконцевыми фрезами, не могут в достаточной степени увеличить срок службы инструментов из-за ограниченной толщины покрытий. Например, наносить на микрофрезы с радиусом режущей кромки 6 мкм [3] покрытия толщиной 3–5 мкм нецелесообразно. Однако при снятии с поверхности концевой фрезы поверхностного слоя толщиной 4 мкм и последующем нанесении на него износостойкого покрытия толщиной 4 мкм можно получить инструмент с таким же рельефом поверхности и повышенным сроком службы. Такая замена материала поверхности концевой микрофрезы с помощью механической обработки представляется весьма затруднительной. Поэтому в данной работе для удаления поверхностного слоя материала концевой фрезы применялась обработка пучком быстрых атомов аргона [4,5], а для нанесения износостойкого покрытия применялось магнетронное осаждение [6,7].

Материалы и методика

В качестве образцов для экспериментов были выбраны концевые фрезы фирмы Iscar (Израиль) с номинальным диаметром 1 мм, длиной рабочей части 2 мм и с номинальным углом стружечной канавки 30 градусов (рис. 1). Материал концевых фрез – цельный карбид титана типа IC08 Micrograin: монокристалл (WC-80%; Co-20%) с размером карбидного зерна 0,4–0,8 мкм. Рабочие поверхности концевых фрез шлифованы и не имеют покрытий.

При обработке концевой фрезы необходимо контролировать ее геометрические параметры. Радиус ее режущей кромки измеряли с помощью сканирующего электронного микроскопа PHENOM G2 PRO производства PHENOM (Нидерланды).



Рисунок 1. Концевая фреза диаметром 1 мм с углом наклона стружечной канавки 30 градусов

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для заточки режущих кромок твердосплавных микроконцевых фрез и последующего осаждения износостойких покрытий. Она состоит из рабочей камеры диаметром 50 см, длиной 40 см и источника пучка быстрых атомов аргона. Внутри источника пучка расположены полый катод длиной 25 см и диаметром 40 см и вогнутая сетка диаметром 30 см с радиусом кривизны поверхности 40 см.

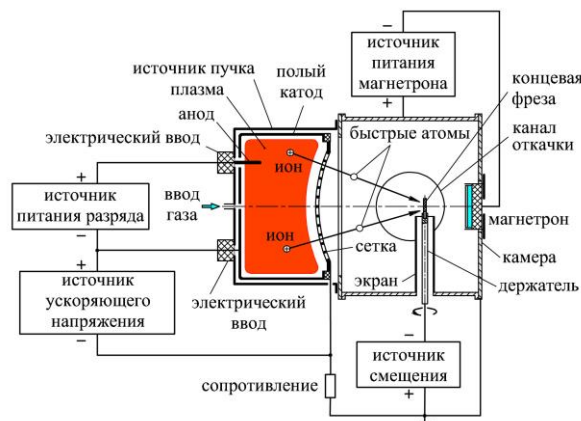


Рисунок 2. Установка для обработки микроконцевых фрез

На поверхности сетки равномерно распределены отверстия диаметром 7 мм на расстоянии 8 мм между их центрами. Рабочий газ подается в источник пучка, через сетку поступает в рабочую вакуумную камеру и покидает ее через канал откачки диаметром 20 см на боковой стенке камеры. Напротив канала откачки имеется дверца диаметром 25 см, позволяющая загружать инструменты и образцы в камеру. На дверце имеется кварцевое окошко с подвижной задвижкой, защищающей от осаждения пленок. Окно позволяет измерять температуру обрабатываемой концевой фрезы инфракрасным пирометром.

В нижней части камеры установлен вращающийся со скоростью 60 об/мин держатель. При установке концевой фрезы в гнездо держателя ее режущая часть находится в фокусе сетки.

Напротив сетки установлена магнетронная мишень диаметром 10 см из диборида титана. Ось концевой фрезы находится на расстоянии 10 см от мишени.

При давлении аргона 0,2 Па включение источника питания разряда и источника ускоряющего напряжения приводит к зажиганию тлеющего разряда [8-10] и заполнению полого катода плазменным эмиттером ионов [11,12]. Ионы ускоряются сеткой и через ее отверстия влетают в камеру. Энергия ускоренных ионов равна $E_i = e(U_p + U)$, где e – заряд электрона, U_p – разрядное напряжение между анодом и полым катодом, U – ускоряющее напряжение между полым катодом и камерой. При $U_p = 400$ В и $U = 3600$ В энергия ионов равна 4000 эВ.

За счет перезарядки при столкновениях с атомами газа ускоренные ионы превращаются в камере в быстрые нейтральные атомы с той же кинетической энергией. Учитывая, что плотность газа при давлении 0,2 Па равна $n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ [13], а сечение перезарядных столкновений ионов аргона с энергией 4 кэВ равно $\sigma_{\text{п}} = 2 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$ [14,15], получаем для длины свободного пробега ионов аргона между столкновениями с перезарядкой $\lambda_{\text{п}} = 1/n_0\sigma_{\text{п}} = 0,1$ м. Поскольку расстояние 0,4 м между сеткой и концевой фрезой, расположенной в фокусе сетки, в четыре раза больше, можно считать, что все ионы, попавшие на поверхность инструмента, уже превратились в быстрые атомы аргона.

Для определения плотности потока быстрых атомов на поверхности образцов на разных расстояниях h от центра сетки в отсутствие держателя устанавливали плоские мишени. На рис. 3 представлена зависимость диаметра D отпечатка пучка на мишени от ее расстояния h до центра сетки. Сначала она монотонно убывает от $D = 10$ см на расстоянии $h = 27$ см до $D = 2$ см при $h = 37$ см, а затем снова возрастает до $D = 4$ см при $h = 45$ см. Столь высокая компрессия на расстоянии от сетки $h \sim 40$ см достигается за счет отсутствия в пучке электрических зарядов.

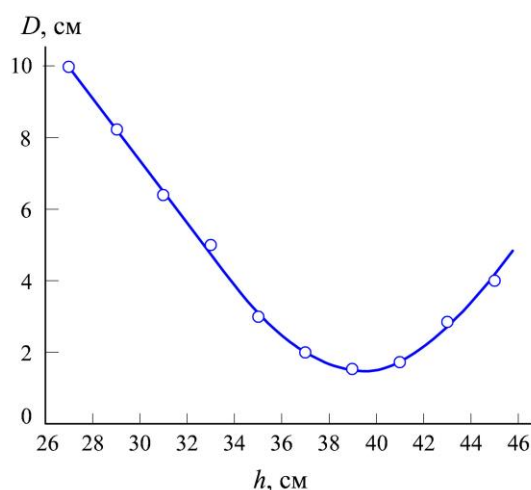


Рис. 3. Зависимость диаметра отпечатка пучка D от расстояния до сетки h .

После установки микроконцевой фрезы с радиусом режущей кромки на держатель камеру заполняли аргоном под давлением 0,2 Па. При включении источников питания зажигался тлеющий разряд, и вращающаяся фреза в течение получаса обрабатывалась атомами аргона с энергией 4000 эВ. Измеренная инфракрасным пирометром в процессе обработки температура ее хвостовика составила 750 °С. Через окошко было видно красное свечение фрезы. Такая температура недопустима для многих инструментальных материалов, но для карбида вольфрама она является вполне приемлемой.

На хвостовике извлеченной из гнезда держателя концевой фрезы была обнаружена ступенька между поверхностью, закрытой держателем, и открытой поверхностью, протравленной быстрыми атомами аргона. С помощью профилометра HOMMEL TESTER T8000 была измерена высота ступеньки 1,2 мкм. Измерения на сканирующем электронном микроскопе PHENOM G2 PRO выявили уменьшение радиуса режущей кромки от 4,2 мкм до 3 мкм, т.е. на 1,2 мкм, что равно толщине удаленного поверхностного слоя хвостовика.

Другая фреза с начальным радиусом режущей кромки 4,3 мкм обрабатывалась в течение 1,5 ч. При этом толщина удаленного слоя хвостовика составила 3,5 мкм, а радиус режущей кромки уменьшился с 4,3 мкм до 1,5 мкм, т.е. на 2,8 мкм, что меньше толщины удаленного слоя хвостовика.

После обработки в течение 2 ч третьей фрезы с радиусом режущей кромки 4,2 мкм толщина слоя, удаленного с поверхности хвостовика, равнялась 5 мкм, а радиус режущей кромки уменьшился с 4,2 мкм до 1,2 мкм, т.е. на 3 мкм, что меньше толщины удаленного слоя хвостовика. Это означает, что обрабатывать концевые фрезы более 1,5 часов нет смысла, так как радиус режущей кромки остается постоянным на уровне $\sim 1,5$ мкм. Можно связать это с размером карбидного зерна 0,4–0,8 мкм, который определяет нижний предел радиуса режущей кромки.

Сразу после обработки в течение 1,5 ч четвертой фрезы был включен источник питания магнетрона с током в цепи мишени магнетрона 4 А и напряжении 430 В. С помощью пирометра установлено, что после выключения источника пучка температура концевой фрезы снизилась до 450 °С и оставалась на этом уровне в течение 1 ч до конца осаждения покрытия.

После осаждения покрытия радиус режущей кромки фрезы составил 4 мкм. Учитывая, что в результате 1,5-часового травления быстрыми атомами аргона радиус режущей кромки уменьшился до 1,5 мкм, можно предположить, что радиус режущей кромки увеличился с 1,5 мкм до 4 мкм за счет последующего осаждения покрытия толщиной 2,5 мкм, а высота ступени хвостовика уменьшилась с 3,5 мкм до 1 мкм.

Испытания на износостойкость модифицированных твердосплавных микроконцевых фрез проводились на сверлильно-фрезерном станке с ЧПУ Bungard CCD/ATC фирмы Bungard (Германия) с точностью позиционирования пневмопривода $\pm 2,5$ мкм с высокоскоростным шпинделем KAVO 150. Вт, 25 000–60 000 об/мин (рис. 4). Ими обрабатывали пазы для подачи охлаждающей жидкости на пластинах из бронзы марки БрАЖ9-4. Все эксперименты проводили при частоте вращения шпинделя 50 000 об/мин, осевой глубине резания 100 мкм, скорости подачи 150 мм/мин и длине обработки 500 мм.

Шероховатость (R_a и R_z) обработанной поверхности измеряли с помощью стилусного профилометра Dektak XT, а размеры заусенцев измеряли с помощью оптического микроскопа Axiotech Vario фирмы Carl Zeiss (Геттинген, Германия). В качестве критерия разрушения фрезы был принят износ по задней поверхности в 150 мкм. Его измеряли с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Phenom G2 PRO.

Для оценки эффективности модификации микроконцевой фрезы пучком быстрых атомов с последующим нанесением покрытия TiB_2 сравнивали шероховатость поверхности канавок, изготовленных исходной фрезой, фрезой с покрытием TiB_2 и фрезой, покрытой TiB_2 после травления быстрыми атомами аргона. Шероховатость поверхности канавки, обработанной концевой микрофрезой, после комбинированной модификации минимальна. Это связано с уменьшением радиуса режущей кромки микроконцевой фрезы после заточки быстрыми атомами аргона и улучшением ее трибологических характеристик за счет нанесения антифрикционного покрытия TiB_2 .



Рисунок 4. Фотография сверлильно-фрезерного станка с ЧПУ «Bungard CCD/ATC

Рис. 5 показывает, что размер заусенцев при использовании микроконцевых фрез, покрытых TiB_2 после травления быстрыми атомами, минимален. Более крупные заусенцы обнаружены для концевой микрофрезы с покрытием из TiB_2 толщиной 2,5 мкм. Это связано с увеличением радиуса режущей кромки концевой микрофрезы, что препятствует правильному образованию стружки.

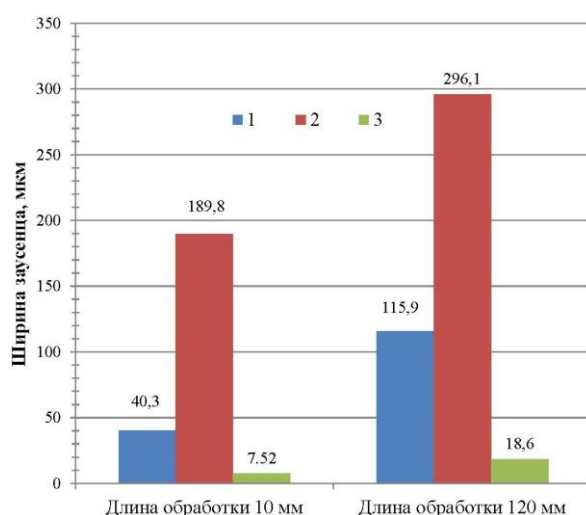


Рисунок 5. Диаграмма размера заусенцев после микрофрезерования: исходной микрофрезой (1); концевой микрофрезой с покрытием TiB_2 толщиной 2,5 мкм (2); концевой микрофрезой с покрытием TiB_2 толщиной 2,5 мкм, осажденным после удаления поверхностного слоя толщиной 2,5 мкм (3).

Испытания на износостойкость показали, что износостойкое покрытие увеличивает срок службы микроконцевых фрез в 1,6 раза, а комбинированная модификация – в 2,6 раза.

Выводы

1. Равномерное травление поверхности микроконцевых фрез быстрыми атомами аргона позволяет получить радиусы режущей кромки значительно меньшие, чем при механическом шлифовании. Нижний предел радиуса режущей кромки твердосплавных микроконцевых фрез связан с размером карбидного зерна 0,4–0,8 мкм.

2. Значительное уменьшение радиуса режущей кромки микроконцевой фрезы за счет обработки быстрыми атомами аргона позволяет наносить покрытие из диборида титана толщиной 3 мкм без достижения порога размерного эффекта, что существенно улучшает качество обработки.

3. Износостойкое покрытие из диборида титана, нанесенное после заточки микроконцевой фрезы быстрыми атомами аргона, увеличивает срок ее службы в 2,6 раза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00517, <https://rscf.ru/project/23-19-00517/>. При проведении работ было задействовано оборудование Центра коллективного пользования (ЦКП) Станкин (проект Министерства высшего образования РФ 075-15-2021-695).

Список литературы

1. Aramcharoen A. Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel / A. Aramcharoen, P.T. Mativenga, S. Yang, K.E. Cooke, D.G. Teer // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 2008 – V. 48, P.1578–1584.

2. Oliveira F.B. Size effect and minimum chip thickness in micromilling / F.B. Oliveira, A.R. Rodrigues, R.T. Coelho, A.F. Souza // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 2015 – V. 89, P. 39–54.

3. Shi Z. Determination of minimum uncut chip thickness during micro-end milling Inconel 718 with acoustic emission signals and FEM simulation / Z. Shi, Y. Li, Z.Q. Liu, Y. Qiao // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2018 – V. 98, P. 37–45.

4. Метель А.С. Источник импульсных пучков высокоэнергетических молекул газа / А.С. Метель, Ю.А. Мельник, В.П. Болбуков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015 – № 4(35). С. 74–78.

5. Метель А.С. Пучки быстрых нейтральных атомов и молекул в плазме газового разряда низкого давления / А.С. Метель // Физика плазмы. – 2012 – Т. 38. № 3. С. 281–289.

6. Григорьев С.Н. Компактный источник пара материала проводящей мишени, распыляемой ионами с энергией 3 кэВ при давлении 0,05 Па / С.Н. Григорьев, Ю.А. Мельник, А.С. Метель, В.В. Панин, В.В. Прудников // Приборы и техника эксперимента. – 2009 – № 5. С. 127–133.

7. Метель А.С. Магнетронное распылительное устройство с генерацией импульсных пучков высокоэнергетических атомов газа / А.С. Метель, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, Ю.А. Мельник // Приборы и техника эксперимента. – 2017 – № 2. С. 144–151.

8. Oks, E.M. Low-pressure hollow-cathode glow discharge plasma for broad beam gaseous ion source / E.M. Oks, A.V. Vizir, G.Y. Yushkov // Rev. Sci. Instrum. – 1998 – V. 69, P. 853–855.

9. Gavrilov N. Development of technological sources of gas ions on the basis of hollow-cathode glow discharges / N. Gavrilov, G. Mesyats, G. Radkovski, V. Bersenev // Surf. Coat. Technol. – 1997 – V. 96, P. 81–88.

10. Метель А.С. Заполнение рабочей камеры технологической установки однородной плазмой с помощью стационарного тлеющего разряда / А.С. Метель, С.Н. Григорьев, Ю.А. Мельник, В.В. Панин // Физика плазмы. – 2009 – Т. 35. № 12. С. 1140–1149.

11. Gavrilov, N.V. New broad beam gas ion source for industrial application / N.V. Gavrilov // J. Vac. Sci. Technol. A – 1996 – V. 14, P. 1050–1055.

12. Anders A. A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching / A. Anders // Thin Solid Films – 2010 – V. 518, P. 4087–4090.

13. McDaniel E.W. Collision Phenomena in Ionized Gases / E.W. McDaniel. – New York: Wiley, 1964.

14. Phelps A.V. Cross sections and swarm coefficients for nitrogen ions and neutrals in N₂ and argon ions and neutrals in Ar for energies from 0.1 eV to 10 keV / A.V. Phelps // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1991 – V. 20, P. 557–573.

15. Phelps A.V. Collision cross sections for argon atoms with argon atoms for energies from 0.01 eV to 10 keV / A.V. Phelps, C.H. Greene, J.P. Burke // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2000 – V. 33, P. 2965–2981.

УДК 621.01

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛИНЕЙНЫХ ПОДШИПНИКОВ

*Л.Л. Новиков¹,
Е.А. Левченко¹*

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Подшипники являются основными базовыми компонентами, которые определяют стабильную работу оборудования высокого класса. Традиционная технология обработки поверхности оказалась неспособной удовлетворить современным требованиям к высокой точности обработки и высокому качеству поверхности при условии определенной эффективности. Как одна из технологий сверхточного шлифования, электрохимическое шлифование сочетает в себе преимущества электрохимической обработки, компенсирует недостатки традиционного шлифования и обеспечивает эффективный способ решения этой проблемы. Электрохимическая обработка успешно применяется для процесса шлифования направляющих линейных подшипников. Подробно описан принцип обработки с помощью электрохимического шлифования. На основе этого устанавливается модель скорости удаления материала из заготовки.

Ключевые слова: электрохимическое шлифование, линейные подшипники, обработка, электролиты, повышение эффективности.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ELECTROCHEMICAL GRINDING OF LINEAR BEARING GUIDES

*L.L. Novikov¹,
E.A. Levchenko¹*

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

Bearings are the main basic components that determine the stable operation of high-end equipment. Traditional surface treatment technology has proved unable to meet modern requirements for high processing accuracy and high surface quality, provided a certain efficiency. As one of the

technologies of ultra-precise grinding, electro-chemical grinding combines the advantages of electrochemical processing, compensates for the disadvantages of traditional grinding and provides an effective way to solve this problem. In this article, electrochemical treatment is successfully applied to the grinding process of linear bearing guides. The principle of processing using electrochemical grinding is described in detail. Based on this, a model of the rate of removal of material from the workpiece is established.

Keywords: electrochemical grinding, linear bearings, processing, electrolytes, efficiency improvement.

Постановка проблемы. В современной индустрии производства подшипников широко применяется электрохимическое шлифование для обработки поверхностей. Одной из важных частей подшипников являются направляющие линейные подшипники, которые обеспечивают плавное и точное движение вдоль осей. Однако, при производстве данных подшипников возникает ряд проблем, связанных с качеством шлифовки поверхностей направляющих. В данной статье будет рассмотрено использование электрохимического шлифования для повышения эффективности обработки направляющих линейных подшипников.

Цель статьи заключается в определении влияния технологических параметров на эффективность процесса шлифования.

Анализ литературы. В различных исследованиях, проведенных учеными как в России (Байсупов И.А., Вайнберг Р.Р., Лазаренко Б.Р., Лукомский Ю.Я., Подураев В.Н., Попилов Л.Я., Пяндрин Т.Н., Смоленцев В.П., Гродзинский Э.Я., Давыдов А.Д., Каримов А.Х., Мороз И.И.), так и за рубежом (Ньюмен Дж., Смоленцев В.П., Волков Ю.С.), были освещены фундаментальные положения обеспечения качества и точности в теории шлифования [1-6].

Однако анализ этих исследований указывает на отсутствие общего теоретического решения о максимально возможной производительности обработки, обусловленной параметрами режущего рельефа круга. Это препятствует научно обоснованному подходу к установлению оптимальных режимов шлифования и решению поставленной задачи. Таким образом, необходимы дальнейшие исследования и усилия ученых для разработки общей теории и получения точных решений, которые позволят на практике оптимизировать процессы шлифования с учетом параметров режущего рельефа круга и обеспечить высокое качество и точность обработки.

Введение. Электрохимическое шлифование является особым видом шлифования, который использует электрохимическое разрушение поверхностного слоя материала. Этот метод может быть применен для обработки различных поверхностей, включая направляющие линейных подшипников. Направляющие линейных подшипников используются во многих областях, таких как машиностроение, автомобильная промышленность, а также в производстве электроники. Повышение эффективности электрохимического шлифования направляющих линейных подшипников может значительно улучшить качество и долговечность этих изделий.

Кольцо подшипника как ключевой компонент подшипника, является важной рабочей поверхностью подшипника, ее качество напрямую влияет на производительность и срок службы подшипника. Высокоуглеродистая хромистая подшипниковая сталь GCr15 широко используется в материалах для формирования колец подшипников из-за низкого содержания сплава, высокой и равномерной твердости, хорошей износостойкости и высоких характеристик контактной усталости после закалки и отпуска. Однако традиционный процесс погружного внутреннего шлифования подшипника ограничен технологической системой, и обработанное кольцо подвержено пригоранию при шлифовании, низкой точности обработки и производительности. Исходя из состояния исследований в стране и за рубежом, появление технологии обработки композитных материалов дает возможность эффективно решить

проблемы, существующие в традиционной технологии обработки, и повысить рабочие характеристики и срок службы подшипников, включая исследования и применение электрохимического шлифования [7].

Как типичная технология обработки композитных материалов, электрохимическое шлифование сочетает в себе преимущества электрохимической обработки и компенсирует недостатки традиционного шлифования. Это имеет большое значение для обработки спеченных карбидов, суперсплавов, композитов с металлической матрицей, цементированных карбидов и других труднообрабатываемых материалов. В соответствии с базовой формой шлифования электрохимическое шлифование может выполняться на внутренней и наружной поверхностях, а также на цилиндрических и формовочных поверхностях. Таким образом, его можно разделить на электролитическое поверхностное шлифование, электролитическое торцевое шлифование, электролитическое внутреннее шлифование, электролитическое наружное шлифование и электролитическое формовочное шлифование. По сравнению с традиционным шлифованием, помимо требований к электропроводности, электрохимическое шлифование свободна от ограничений, связанных с труднообрабатываемыми характеристиками, такими как твердость обрабатываемого материала. Он может использоваться для обработки практически любого токопроводящего материала и обеспечивает более высокую скорость удаления материала, меньшие повреждения при обработке, более длительный срок службы шлифовального круга и более гладкую обрабатываемую поверхность без заусенцев. Конечно, у электрохимического шлифования также есть некоторые проблемы, включая рассеянную коррозию и вредное перерезание [8-10].

Как показано на (рис. 1), заготовка подключена к положительному электроду импульсного источника постоянного тока, а шлифовальный круг подключен к отрицательному электроду импульсного источника постоянного тока. Электролит, который отфильтровывает стружку и продукты реакции, подается в зону обработки в виде струи через сопло. При вращении шлифовального круга электролит попадает в обрабатываемый зазор между шлифовальным кругом и обрабатываемой деталью. При микроскопической ЭКГ на поверхности заготовки образуется тонкая пассивирующая пленка во время растворения анода, но вновь образовавшаяся пассивирующая пленка будет быстро соскабливаться абразивными частицами под действием механического шлифования, а затем вновь открытая металлическая поверхность анода будет продолжать подвергаться электролизу, и так поочередно, пока заготовка не достигнет определенной точности размеров и шероховатости поверхности. В электролитической схеме, состоящей из катода инструмента, анода заготовки и электролита, скорость растворения заготовки при анодном окислении различна из-за ограничений типа и концентрации электролита и внешних условий. При радиальном разрезании шлифовального круга различные степени электрохимического растворения и механического соскабливания приводят к различным эффектам обработки.

В зависимости от направления вращения обрабатываемой детали зона обработки при электрохимическом внутреннем шлифовании может быть поочередно разделена на три зоны. На входе и выходе электролита области, где межэлектродный зазор больше высоты выступа абразивного зерна и достигает напряжения разложения материала обрабатываемой детали, являются зонами 1 и 3, а область, где межэлектродный зазор в средней части равен или немного меньше высоты выступа абразивного зерна, является зоной 2. В первой или третьей областях в аноде происходит только электрохимическое растворение, в то время как во второй области попеременно проявляются микроэффекты анодного растворения металла и механического соскабливания пассивирующей пленки или пассивирующей пленки и небольшого количества металлической матрицы. В отличие от анодного растворения заготовки в первой зоне, в третьей зоне сбрасывается давление электролита, и образующиеся пузырьки

снижают проводимость электролита в этой области, а механические царапины и заусенцы, образовавшиеся во второй зоне, будут в определенной степени выровнены и устранены в этой области из-за разницы микрозазоров.

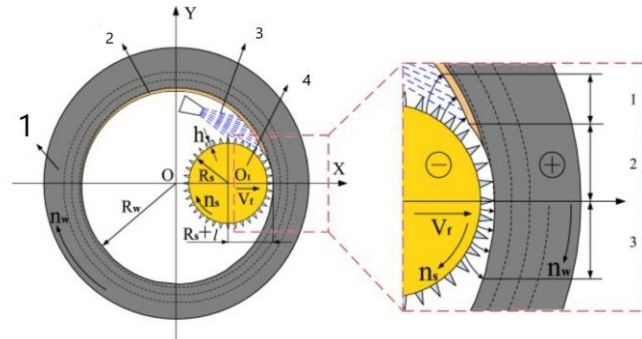


Рисунок 1. Принципиальная схема электрохимического внутреннего шлифования (Зоны-1,2,3)
1-деталь; 2-пассивирующая пленка; 3-электролит; 4-шлифовальный круг

На (рис. 2) показан процесс электрохимического внутреннего шлифования. В соответствии с эквивалентным процессом шлифования в окружной плоскости, процесс электрохимического внутреннего шлифования можно разделить на три стадии обработки: начальное шлифование, стабильное шлифование и легкое шлифование. Поскольку балансный зазор обработки неизвестен, начальный зазор обработки задан заранее. Начальное состояние шлифования включает в себя начало с заданного начального зазора обработки и окончание стабильным состоянием шлифования. На этом этапе шлифовальный круг вначале не соприкасается с обрабатываемой деталью, и удаление материала заготовки зависит только от электрохимического растворения. При использовании пассивирующего электролита при подаче шлифовального круга пассивирующая пленка, образующаяся на поверхности заготовки, постепенно становится толще, и, соответственно, усиливается препятствие электрохимическому растворению. При увеличении зазора обработки l меньше высоты выступа h при абразивном зерне начинается механическое соскабливание материала обрабатываемой детали. Когда эффект электролиза и механическое воздействие уравновешены, обработка переходит в режим стабильного шлифования. После достижения требуемого размера обрабатываемой детали шлифовальный круг прекращает подачу и выполняет определенное время легкого шлифования для дальнейшего улучшения качества обработки заготовки [3].

Из характеристик процесса ЭКГ видно, что основным методом удаления анодного материала заготовки ЭКГ является электрохимическое растворение, которое может быть качественно проанализировано и количественно рассчитано, а основным законом, который может глубоко раскрыть закономерности процесса электролиза, является закон Фарадея.

Согласно закону Фарадея, объем аноднорастворенного металла равен:

$$V = M / \rho = \kappa It, \quad (1)$$

где V - объем аноднорастворенного металла (см^3); M - масса металла, растворенного в анодном растворе (г); ρ - плотность металла ($\text{г}/\text{см}^3$); κ является ли массовый электрохимический эквивалент ($\text{г}/(\text{А} \cdot \text{с})$ или $\text{г}/(\text{А} \cdot \text{мин})$); I - сила тока (А); t ток через время (с или мин); ω - является объемным электрохимическим эквивалентом ($\text{см}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$ или $\text{см}^3/(\text{А} \cdot \text{мин})$) [2].

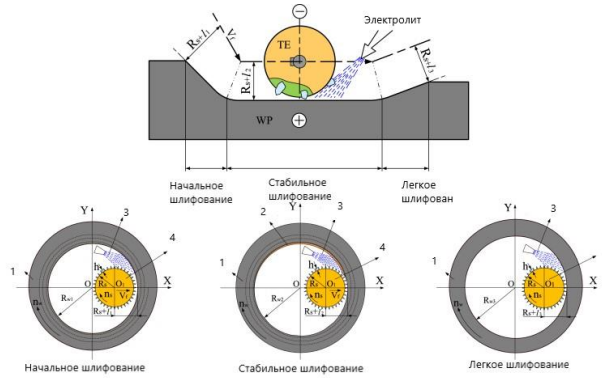


Рисунок 2. Процесс электрохимического внутреннего шлифования.

Возьмем в качестве примера плоскостную обработку, предполагая, что площадь обработанной поверхности равна S с учетом эффективности обработки в реальных условиях обработки скорость растворения заготовки в направлении вертикальной плоскости может быть получена из уравнения (1):

$$v_a = \eta \frac{V}{St} = \eta \frac{\omega It}{St} = \eta \omega i, \quad (2)$$

где v_a - скорость растворения в нормальном направлении к обрабатываемой поверхности анодной заготовки (мм/мин); η - текущая эффективность; i это плотность тока (А/мм²).

Из закона Ома $I=U/R$ и определение стойкости можно получить:

$$I=US/l. \quad (3)$$

Заменяем уравнение (3) на определение плотности тока $i=I/S$, имеется:

$$i=kU/l \quad (4)$$

В сочетании с уравнением (4) с учетом общего перенапряжения E ($E=E_a-E_c$, E_a и E_c являются ли перенапряжения анода и катода соответственно единицей измерения: V) и доля проводящей площади шлифовального круга из-за присутствия изолирующих абразивных частиц β соответствующая плотность тока может быть выражена как:

$$i = \beta k(U - E) / l, \quad (5)$$

где k - это проводимость электролита (1/Ом·мм); U - это напряжение обработки (В); l - зазор при обработке (мм).

Как показано на (рис. 3) изменения потенциала электрода за период импульса, соответствующие процессу импульсного электролиза, происходит явление заряда и разряда. За один период импульса T , только при $U > U_a$, то есть в диапазоне времени $t_1 \sim t_2$ анод обрабатываемой детали растворится.

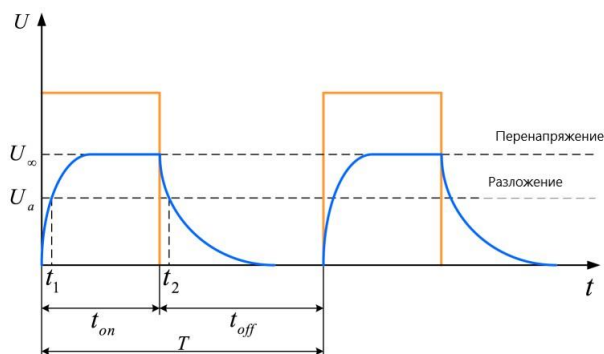


Рисунок 3. Изменение потенциала электрода за период импульса

Как показано на (рис. 4), эксперимент основан на обычном токарном станке, независимо разработанном модифицированном устройстве. Все устройство включает в себя четыре части: механизм перемещения станка и систему управления им, систему фильтрации циркуляции электролита, устройство для придания формы шлифовальному кругу на месте, а также вспомогательное электрооборудование и его компоненты. Основной шлифовальный круг с металлическим соединением и заготовка кольца подшипника, обрабатываемая устройством, используют токопроводящее контактное кольцо для обеспечения вращающегося источника питания. Ограниченный конструкцией станка и учитывая электрическую изоляцию станины, в качестве моторизованного шпинделя выбран полый моторизованный шпиндель с опорной конструкцией из керамических подшипников, а пневматический зажимной патрон приспособления для заготовки имеет двухступенчатую конструкцию из металлической зажимной секции и нейлоновой изоляционной секции [8].

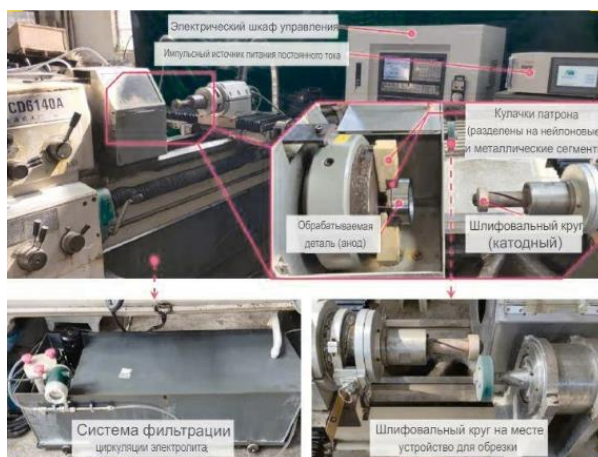


Рисунок 4. Экспериментальное устройство для электрохимического шлифования внутренней поверхности подшипника

Перед экспериментом параметры обработки были получены путем предэкспериментального анализа. В ходе эксперимента катодный шлифовальный круг перемещается в исходное положение зазора для обработки с помощью языка программирования системы числового управления. После того, как подача электролита стабилизируется, заготовку поочередно подвергают погружной электрошлифовке и легкому шлифованию. Соответствующие параметры обработки приведены в (таблице 1). Кроме того,

тип связующего для катодного шлифовального круга, использованного в эксперименте, - оловянная бронза, а заготовка для анода - наружное кольцо подшипника из высокоуглеродистой хромистой стали GCr15, закаленное под давлением. Конкретные параметры этих двух устройств приведены в (таблице 2).

Таблица 1. Параметры обработки

Значение	Параметры
Начальный зазор	0,3мм
Электролит	20 мас.% NaNO ₃
Расход электролита	10 л/мин
Время легкого измельчения	10 с
Напряжение обработки (U)	5-15 В
Скорость подачи (Vf)	0,1–0,25 мм/мин
Коэффициент заполнения (D)	3000-7000 об/мин
Скорость обработки заготовки	35 об/мин

Таблица 2. Параметры шлифовального круга и заготовки

Значение	Параметры
Наружный диаметр шлифовального круга	60 мм
Ширина шлифовального круга	20 мм
Тип абразивного зерна	CBN
Концентрация абразивного зерна	150%
Наружный диаметр заготовки	110 мм
Внутренний диаметр заготовки	100 мм
Ширина заготовки	40 мм

На (рис. 5) показано влияние напряжения обработки, скорости подачи, коэффициента заполнения и скорости вращения шлифовального круга на шероховатость поверхности заготовки кольца подшипника после шлифования. При соблюдении определенных параметров обработки шероховатость поверхности заготовки после шлифования сначала уменьшается, а затем увеличивается с увеличением напряжения обработки (рис. 6(a)). При напряжении обработки 10 В шероховатость поверхности заготовки наименьшая, ее значение составляет Ra 0,432 мкм. В соответствии с напряжением обработки, при условии приложенного напряжения

10 В шероховатость поверхности заготовки после шлифования сначала уменьшается, а затем увеличивается с увеличением скорости подачи шлифовального круга (рис. 6(б)), и минимальная шероховатость поверхности заготовки достигается при скорости подачи 0,1 мм/мин. В отличие от напряжения обработки и скорости подачи, коэффициент заполнения и скорость вращения шлифовального круга практически не влияют на шероховатость поверхности обрабатываемой детали. При параметрах обработки, таких как напряжение обработки 10 В и скорость подачи 0,1 мм/мин, шероховатость поверхности заготовки после шлифования незначительно изменяется в зависимости от коэффициента заполнения и скорости шлифовального круга (рис. 6(с) и (d)), а также в диапазоне коэффициента заполнения и скорости шлифовального круга измеренная шероховатость поверхности заготовки лучше, чем при чисто механическом шлифовании ($R_a = 0,686$ мкм). Анализ показывает, что в диапазоне применяемых параметров обработки, когда напряжение низкое, а подача быстрая, что соответствует случаю $V_f > v_a | \theta = 0$, материал заготовки подчеркивает удаление механического шлифования, а шероховатость поверхности заготовки, в которой преобладает размер частиц абразива, является низкой. Когда напряжение высокое, а подача медленная, что соответствует случаю $V_f < v_a | \theta = 0$, материал заготовки подчеркивает эффект электролитической коррозии, который необходимо устранить. Поскольку материал заготовки содержит нерастворимые вещества, абразивные частицы слегка сдавливаются и соскальзывают. Поверхность заготовки аналогична поверхности при электрохимической обработке, а шероховатость поверхности оставляет желать лучшего. Что касается рабочего цикла и скорости шлифовального круга, то изменение, вызванное изменением этих двух параметров в пределах диапазона, близко к равновесному состоянию, поэтому плавающий диапазон значения шероховатости поверхности заготовки очень мал.

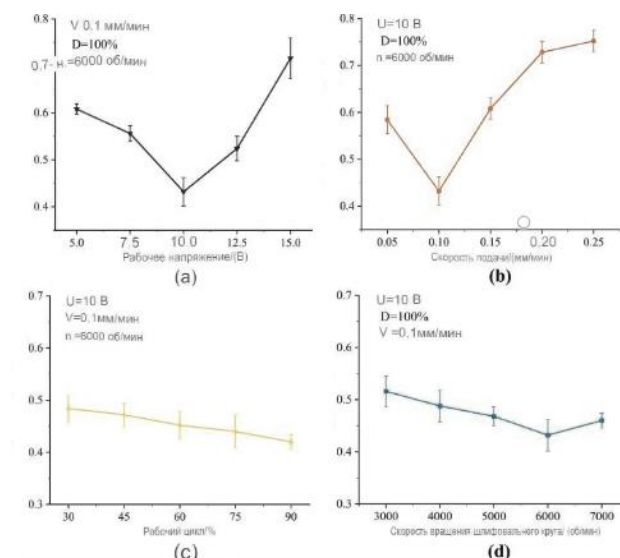


Рисунок 5. Влияние технологических параметров на шероховатость поверхности обрабатываемой детали

На (рис. 6) показана микроморфология обработанной поверхности при различных параметрах обработки. В сочетании с влиянием параметров процесса на шероховатость поверхности заготовки на рис. 6, по сравнению с чисто механическим шлифованием (рис. 7(d)), можно наблюдать, что при условии низкого напряжения обработки 5 В и высокой скорости подачи 0,25 мм/мин поверхность заготовки на заготовке видны явные следы механического

шлифования (рис. 7(а) и (f)), а при скорости подачи 0,25 мм/мин, при усилении механического шлифования и дальнейшем уменьшении зазора при обработке, на поверхности заготовки появляется небольшое количество заусенцев и точек эрозии искровым разрядом (рис. 7(f)); при высоком напряжении обработки 15 В и низкой скорости подачи 0,05 мм/мин при удалении материала заготовки преобладает электролитическая коррозия. Несмотря на то, что морфология поверхности после обработки демонстрирует очевидные следы микроэкструзии и микроскользкого трения из-за наличия процесса легкого шлифования, поверхность заготовки все еще сохраняет значительные характеристики электролитической коррозии при сильном электролизе (рис. 7(в) и (е)). Что касается влияния коэффициента нагружения на шероховатость поверхности заготовки, то поверхность с высоким коэффициентом нагружения немного лучше поверхности с низким коэффициентом нагружения (рис. 7(g) и (h)). Анализ показывает, что это связано с низким напряжением обработки, выбранным для эксперимента с коэффициентом полезного действия. При таких условиях обработки, как определенная скорость подачи, эффект электролиза в процессе обработки с низким коэффициентом заполнения является слабым. Следовательно, хотя коэффициент заполнения теоретически может в определенной степени улучшить поле потока, это не было показано в результатах обработки. Для скорости шлифовального круга, соответствующей обычному шлифованию, слишком низкая скорость шлифовального круга, меньшее время трения в единицу времени в одной и той же точке заготовки, плохая шероховатость поверхности заготовки (рис. 7(i)), слишком высокая скорость вращения шлифовального круга приведет к более интенсивной вибрации технологической системы и другим проблемам, которые негативно скажутся на шероховатости поверхности конечной заготовки [5].

По сравнению с приведенными выше экспериментальными результатами, шероховатость поверхности заготовки, показанная на рис. 7(б), является наименьшей, а морфология поверхности более гладкой, что указывает на то, что значения и комбинации параметров обработки ближе к равновесному состоянию при данных условиях обработки.

В настоящее время сочетание электролитической коррозии и механического шлифования в большей степени способствует улучшению шероховатости поверхности.

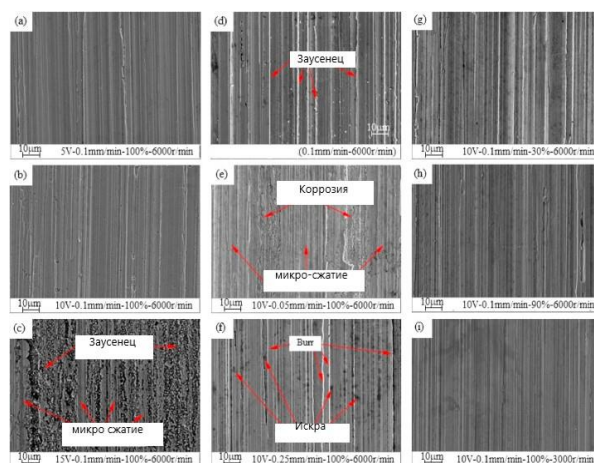


Рисунок 6. Изображения обработанных поверхностей при различных параметрах обработки

Выводы. Проведенные исследования показали, что при электрохимическом шлифовании обработанной поверхности формируются благоприятные сжимающие

напряжения. Эти напряжения имеют значительно большую величину по сравнению с другими методами шлифования. Таким образом, можно заключить, что при электрохимическом шлифовании роль температурного фактора незначительна, поскольку контакт связки с обрабатываемым материалом исключается. Основное влияние на процесс оказывает силовой фактор. Это позволяет добиться более эффективного и точного шлифования поверхности [9].

Однако эффективность электрохимического шлифования направляющих линейных подшипников зависит от нескольких факторов. Одним из ключевых факторов является выбор электролита, который будет использоваться в процессе. Электролит должен обладать определенными свойствами, чтобы обеспечить эффективное разрушение поверхностных слоев материала и достичь требуемого качества поверхности. Другим важным фактором является выбор оптимальных параметров процесса, таких как ток шлифования, скорость подачи и давление. Эти параметры должны быть оптимизированы для каждого конкретного случая, чтобы достичь наилучших результатов.

Оказалось, что электрохимическое шлифование обладает рядом преимуществ по сравнению с механическим методом. Оно позволяет достичь более высокой точности обработки, а также уменьшает риск повреждения детали. Кроме того, электрохимическое шлифование обладает более высокой эффективностью, так как процесс проходит быстрее и имеет более низкие затраты. Впрочем, у электрохимического шлифования есть и недостатки, такие как сложность контроля процесса и ограниченность по формам и размерам обрабатываемых деталей.

В заключении стоит отметить, что электрохимическое шлифование является эффективным методом обработки поверхности направляющих линейных подшипников. Он позволяет обеспечить требуемое качество и точность поверхности, а также улучшить долговечность подшипников. Однако, для достижения оптимальных результатов необходимо правильно выбирать параметры процесса и контролировать его качество. В дальнейшем развитии этого метода можно ожидать улучшение его эффективности и расширение его области применения.

Список литературы

1. Вайнберг Р. Р., Васильев В. Г. Сила резания при электрохимическом шлифовании жаропрочных сплавов. Научно-технический сборник «Алмазы». М., НИИМАШ, 1973, № 2, с. 27—29.
2. Вайнберг Р. Р., Васильев В. Г. Электрохимическое шлифование жаропрочных сплавов алмазными кругами на металлической связке. — В сб. Экономичность и точность абразивно-алмазной обработки. М., МДНТП, 1971. с. 59-64.
3. Захаренко И. П., Савченко Ю. Я. Влияние характеристики алмазных кругов на показатели электролитической совместной обработки твердого сплава. — «Синтетические алмазы», 1973, № 1.
4. И.А. Байсупов. Электрохимическая обработка металлов. — М.: Высшая школа, 1981. — 152 с.
5. Ф.В. Седыкин. Оборудование для размерной ЭХО. — М.: Машиностроение, 1980. — 277 с.
6. В.Ф. Орлов, Б.И. Чугунов. Электрохимическое формообразование. — М.: Машиностроение, 1990. — 240 с.
7. Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов/ под ред. М.В. Щербака. — М.: Машиностроение, 1981. — 263 с.

8. Б.Н. Бирюков. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
9. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
10. Васильев В.Г., Вайнберг Р.Р., Серебренник Ю. Б. Электрохимическое шлифование жаропрочного сплава алмазными кругами. - «Электронная обработка материалов». Академия наук Молдавской ССР. Кишинев, 1974, № 2 (56).

УДК 621.9

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ПОДАЧЕ МАСЛЯНОЙ СОТС С ПРИСАДКАМИ НАНОГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ

**Э.Д. Умеров¹,
У.А. Абдулгазис¹**

¹*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь, Россия*

АННОТАЦИЯ

В статье приведено уравнение теплового баланса с учетом теплофизических особенностей контактного взаимодействия в зоне резания. Это позволило получить математическую модель по определению температуры в зоне резания при сверлении, которая учитывает изменение сил резания с течением времени при подаче СОТС с присадками наноглинистых минералов.

Показано, что применение разработанной масляной СОТС, позволяет снизить температуру в зоне резания за счет охлаждающего (эндотермического) эффекта, которое обеспечивает присадка наноглинистого минерала.

Ключевые слова: Тепловой баланс, зона резания, СОТС, наноглинистые минеральные присадки, энтальпия, температура.

THERMOPHYSICAL FEATURES OF CONTACT INTERACTION IN THE CUTTING ZONE DURING THE SUPPLY OF OIL LUBRICATING AND COOLING TECHNOLOGICAL MEANS WITH ADDITIVES OF NANOGLINACEOUS MINERALS

**E.D. Umerov¹,
U.A. Abdulgazis¹**

¹*Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russia*

ABSTRACT

The article presents the equation of thermal balance taking into account the thermophysical features of contact interaction in the cutting zone. This made it possible to obtain a mathematical

model for determining the LCTM in the cutting zone during drilling, which takes into account the change in cutting forces over time when applying STS with additives of nano-clay minerals.

It is shown that the use of the developed oil-based LCTM allows to reduce the temperature in the cutting zone due to the cooling (endothermic) effect, which is provided by the additive of a nano-clay mineral.

Keywords: thermal balance, cutting zone, LCTM, nanoglinaceous mineral additives, enthalpy, temperature.

Роль СОТС, при исследовании тепловых процессов резания, сводится к конвективному теплообмену окружающей среды с зоной стружкообразования и уменьшения длины пластического контакта, изменяющего тем самым контактные нагрузки.

Проникновение СОТС в область дискретного контакта, позволяет создавать такие условия взаимодействия, которые зависят от его физико-химических свойств. Рассматривая общий случай область дискретного контакта взаимодействия передней поверхности режущего инструмента со стружкой и задней поверхности с обрабатываемой заготовкой, можно наблюдать граничное и полужидкостное трение.

Происходящие теплофизические процессы в рассматриваемой зоне косвенно влияют на тепловую нагруженность зоны стружкообразования и режущего клина.

Рассматривая область полужидкостного и жидкостного трения на основе модельного описания, можно представить следующей схемой (рисунок 1).

Основным тепловым элементом является стружка 1, которая образовываясь, перемещается по передней поверхности режущего инструмента 2. При этом жидкостной слой 5 находится между поверхностями режущего инструмента и стружки, покрытые тонким адсорбированным слоем 3 и 4.

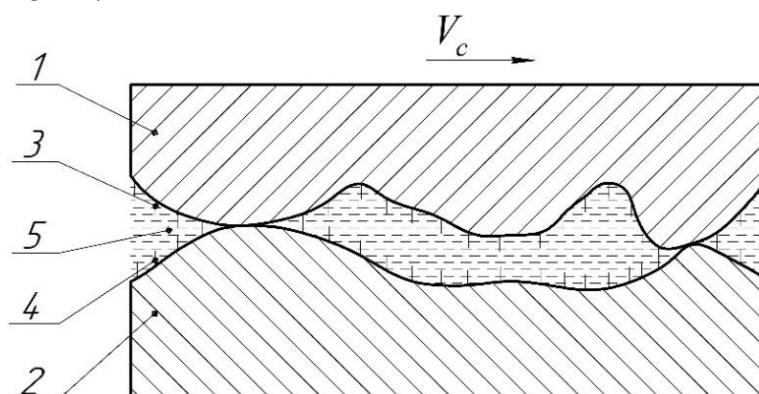


Рисунок 1. Модель области дискретного контакта при резании с СОТС [1].

В работах [2, 3, 4] авторами предложены наноглинистые минеральные присадки (НГМП), которые обладают как охлаждающими, так и улучшенными смазывающими свойствами, показаны механизмы проявления триботехнического эффекта в составе масляной СОТС, а также проведены экспериментальные исследования на операциях сверления, при подаче их в зону резания. Следовательно, известные способы и методы по активации и разработке новых эффективных СОТС могут быть доработаны, что позволит увеличить производительность операции при обработке материалов резанием.

Цель статьи – с учетом теплофизических особенностей контактного взаимодействия разработать математическую модель определения температуры в зоне резания с учетом изменения сил резания при подаче СОТС с присадками наноглинистых минералов.

В работе [5] приведено уравнение теплового баланса для контактной зоны взаимодействия поверхностей сверла и стружки, при подаче масляной СОТС с присадками наноглинистых минералов, обладающей эффектом дегидратации:

$$Q_c + Q_{тр} = Q_{СОТС} + Q_{кон} + Q_{дг} \quad (1)$$

где Q_c – теплота, выделяемая в зоне образования стружки;

$Q_{тр}$ – теплота, выделяемая трением стружки об заготовку и об переднюю поверхность режущего инструмента;

$Q_{СОТС}$ – теплота, поглощаемая СОТС;

$Q_{кон}$ – теплота, уносимая конвективным путем из зоны резания;

$Q_{дг}$ – поглощаемая теплота (теплота дегидратации) присадки СОТС.

Так как тепло, выделяемая в зоне образования стружки очень мала, ее можно пренебречь.

Выделяемая теплота трения стружки об переднюю поверхность режущего инструмента и обработанную поверхность представлена в виде равенства:

$$Q_{тр} = P_z \cdot V_p \cdot \tau, \quad (2)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания;

V_p – скорость резания;

τ – продолжительность процесса резания.

Теплота, поглощаемая СОТС при нагреве в зоне резания, определяется из соотношения:

$$Q_{СОТС} = C_v \cdot M \cdot T, \quad (3)$$

где C_v – удельная теплоемкость СОТС;

M – масса СОТС, участвующая в контактном процессе;

T – температура нагрева СОТС.

Теплота, которая уносится СОТС из зоны резания конвективным процессом теплообмена:

$$Q_{кон} = k \cdot F \cdot T \cdot \tau, \quad (4)$$

где k – коэффициент теплоотдачи;

F – контактная площадь режущего инструмента и стружки.

При этом теплота дегидратации НГМП нами будет рассчитана по аналогии работы [1], но только введя новый коэффициент ($f_{вл}$), характеризующий степень влажности НГМП.

Таким образом, теплота дегидратации НГМП представим в виде:

$$Q_{дг} = M_k \cdot \Delta H \cdot \tau \cdot f_{вл}, \quad (6)$$

где M_k – масса НГМП введенная в СОТС;

ΔH – энтальпия дегидратации НГМП, зависящая от степени ее обезвоживания, которая определяется по дериватограмме, как энергия отрыва молекул воды с поверхности адсорбционного слоя присадки;

$f_{вл}$ – коэффициент влажности НГМП.

С учетом вышеописанного, уравнение теплового баланса (1) запишем в дифференциальном виде:

$$P_z \cdot V_p \cdot d\tau = C_v \cdot M \cdot dT + k \cdot F \cdot T \cdot d\tau + M_k \cdot \Delta H_{дг} \cdot f_{вл} \cdot d\tau. \quad (7)$$

После преобразования имеем:

$$\frac{P_z V_p}{M} = C_v \frac{dT}{dt} + kT \frac{F}{M} + \frac{M_k \cdot f_{вл} \cdot \Delta H_{дг}}{M}. \quad (8)$$

Отношение $\frac{F}{M}$ запишем в следующем виде:

$$\frac{F}{M} = \frac{F}{W \cdot \gamma} = \frac{F}{F \cdot h_{\text{cp}} \cdot \gamma} = \frac{1}{h_{\text{cp}} \cdot \gamma}, \quad (9)$$

где h_{cp} , W – средняя толщина слоя и объем СОТС, которая участвует в процессе контакта между передней поверхностью режущего инструмента и стружки;

γ – плотность СОТС с учетом НГМП.

С учетом (9) дифференциальное уравнение (8) после соответствующих преобразований примет вид:

$$\frac{P_z V_p}{M} - C \frac{dT}{d\tau} - T \frac{k}{h_{\text{cp}} \cdot \gamma} - \frac{M_k f_{\text{вл}}}{M} \Delta H = 0, \quad (10)$$

или

$$\frac{dT}{d\tau} + T \frac{k}{h_{\text{cp}} \cdot \gamma \cdot C} = \frac{P_z \cdot V_p}{M \cdot C} - \frac{M_k \cdot f_{\text{вл}} \cdot \Delta H}{M \cdot C}. \quad (11)$$

Полученное уравнение (10) является неоднородным линейным дифференциальным уравнением первого порядка. Для его решения член $\frac{k}{h_{\text{cp}} \cdot \gamma \cdot C}$ обозначим через a , а правый член

$\frac{P_z \cdot V_p}{M \cdot C} - \frac{M_k \cdot f_{\text{вл}} \cdot \Delta H}{M \cdot C}$ обозначим через b .

Тогда получим уравнение $T' + aT = b$, решение которого имеет вид:

$$T = e^{-at} \left(\frac{b}{a} e^{at} + e \right) = \frac{b}{a} + A e^{-at}$$

и преобразовав его получим:

$$T = \frac{(P_z \cdot V_p - M_k \cdot f_{\text{вл}} \cdot \Delta H) h_{\text{cp}} \gamma}{M \cdot k} + A \cdot \exp \left(-\frac{k \cdot \tau}{h_{\text{cp}} \cdot \gamma \cdot C} \right), \quad (12)$$

где A – постоянная интегрирования, которая определяется при начальных условиях $T = 0$, $\tau = 0$

$$A = -\frac{(P_z \cdot V_p - M_k \cdot f_{\text{вл}} \cdot \Delta H) h_{\text{cp}} \gamma}{M \cdot k}. \quad (13)$$

В конечном виде решение уравнения (8) примет вид:

$$T = \frac{(P_z \cdot V_p - M_k \cdot f_{\text{вл}} \cdot \Delta H) h_{\text{cp}} \gamma C}{M \cdot k \cdot C} \cdot \left(1 - \exp \left(-\frac{k \cdot \tau}{h_{\text{cp}} \cdot \gamma \cdot C} \right) \right). \quad (14)$$

Параметр $\tau_0 = \frac{C \cdot h_{\text{cp}} \cdot \gamma}{k}$ есть стационарное время установления температуры для системы «инструмент-стружка-СОТС».

Если обозначить $\theta = \frac{k}{h_{\text{cp}} \cdot \gamma \cdot C}$, то зависимость (14) преобразится:

$$T = \frac{(P_z \cdot V_p - M_k \cdot f_{\text{вл}} \cdot \Delta H) \theta}{M \cdot C} \cdot (1 - \exp(-\theta \tau)). \quad (15)$$

И с учетом тангенциальной силы резания, полученной в работе [6], зависимость (15) получим в окончательном виде:

$$T = \left[\left(\frac{a \cdot \cos \beta \cdot V_p}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{K}{3} \cdot \frac{C_h V_p^2 \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) \frac{b \tau^2}{M \cdot C} - \frac{M_k \cdot f_{вл} \cdot \Delta H \cdot \theta}{M \cdot C} \right] \times (1 - \exp(-\theta \tau)) \quad (16)$$

Полученное выражение (16) отражает влияние теплофизических и гидродинамических свойств смазки на процесс резания. Можно предполагать, что понижение температуры СОТС возможно за счет снижения динамической вязкости, а увеличение энтальпии термодеструкции может снизить температуру.

Численное значение теоретической зависимости (16) выполнено с помощью ПК для операции сверления в зависимости от скорости резания V_p при обработке коррозионностойкой жаропрочной стали 12Х18Н10Т при подаче различных СОТС, результаты которого представлены на рисунке 2.

Расчеты выполнялись для следующих условий: режущий инструмент – сверло из быстрорежущей стали Р6М5. Принятый допустимый износ по задней поверхности $h = 0,5$ мм. Рассчитанное для данных условий значение коэффициента теплопроводности материала заготовки $\alpha_T = 2,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/м²°С.

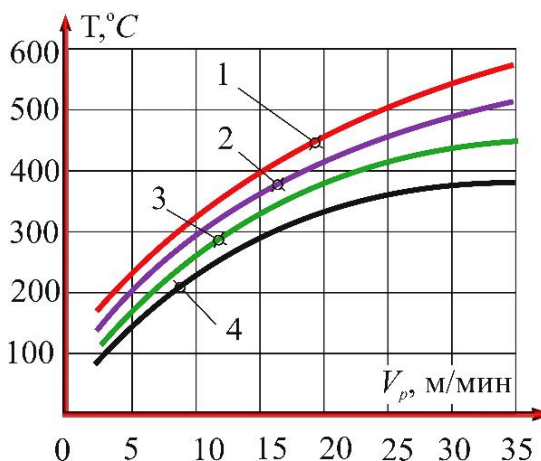


Рисунок 2. Влияние скорости резания и различных составов СОТС на температуру резания:

1 – минеральное масло И-20А; 2 – минеральное масло И-20А с НГМП;

3 – подсолнечное масло; 4 – подсолнечное масло с НГМП.

Проверку теоретических зависимостей проводили с применением стандартных СОТС и с применением масляной СОТС, разработанной на кафедре автомобильного транспорта. Результаты приведены на рисунке 3.

Анализ графика показывает, что применение разработанной масляной СОТС по сравнению со стандартными, позволяет снизить температуру в зоне резания за счет охлаждающего (эндотермического) эффекта, которое обеспечивает присадка наноглинистого минерала, прошедшая специальную обработку. Наличие присадки наноглинистого минерала, наряду с охлаждающим эффектом, дополнительно повышает смазывающее действие СОТС, что и обеспечивает максимальное снижение температуры резания.

Проверка адекватности полученных зависимостей выполнялась путем сравнения теоретических зависимостей с экспериментальными данными.

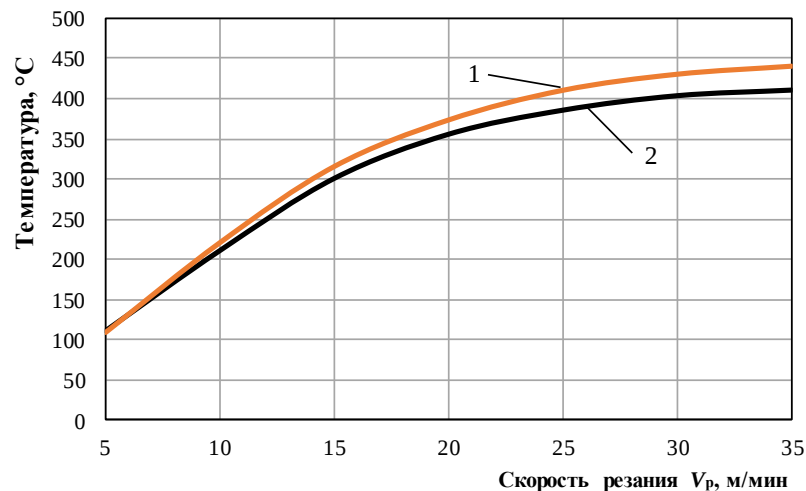


Рисунок 3. Влияние скорости резания и различных составов СОТС на температуру резания:

1 – при подаче стандартной СОТС; 2 – при подаче разработанной СОТС.

Выводы.

1. Установлены закономерности изменения энтальпии присадки наноглинистого минерала от температуры СОТС и ее влияние на снижение температуры СОТС в зоне резания.
2. Полученная математическая модель, позволяет осуществлять расчет температуры в зоне контакта с учетом стойкости режущего инструмента.

Список литературы

1. Якубов Ч.Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / Ч.Ф. Якубов. – Симферополь : ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. – 156 с.
2. Умеров Э.Д. Влияние на коэффициент трения присадки к масляной субстанции СОТС в виде наноглинистого минерала / Э.Д. Умеров, Ш.Т. Мевлют, Д.У. Абдулгазис, У.А. Абдулгазис // Вестник современных технологий. Издательство: ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет" (Севастополь). – №2(18), – 2020. – С.4-9.
3. Умеров Э.Д. Влияние наноглинистой минеральной присадки к масляной СОТС на формирование стружки и качество обработанной поверхности при сверлении конструкционных сталей / Э.Д. Умеров, Д.У. Абдулгазис, У.А. Абдулгазис // Сборник статей «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь 2015»: материалы Международной научно-технической конференции 14-15 сентября 2015 г. – Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2015. – С. 73-79.
4. Abdulgazis D. Development of Endothermic Properties and Improvement of Tribotechnological Properties in Oil Cutting and Cooling Lubricants / Dilyaver Abdulgazis, Ervin Umerov, Umer Abdulgazis // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. Procedia Engineering Volume 206 (2017). – P. 1503–1507. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.669>.
5. Умеров Э.Д. Теплофизическая модель контактного взаимодействия при резании в СОТС с присадками наноглинистых минералов / Э.Д. Умеров, У.А. Абдулгазис // Ученые

записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ имени Февзи Якубова № 3(77), 2022. – С.212-217.

6. Братан С.М. Математическая модель силовой составляющей процесса сверления, учитывающая её изменение во времени / С.М. Братан, П.А Новиков, Э.Д. Умеров // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ имени Февзи Якубова, № 3(69), 2020. – С.212-219.

This image shows a full page of blank white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page, providing a guide for writing. There are no margins, text, or other markings on the paper.

