

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Збірник наукових праць

Випуск 12
(червень, 2018)

Луцьк 2018

УДК 006, 537, 538, 546, 620, 621, 681

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 11 від 22 червня 2018 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:
Серія КВ №18466-7266Р від 15.12.2011р.

ISSN: 2313-5352

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» // м. Луцьк червень 2018р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2018.-196 с.

В збірник включені статті, що відображають наукові та практичні результати сучасних розробок технології машино- та приладобудування, особливості експлуатації та перевірки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та медичних приладів і систем. Представленні сучасні досягнення та перспективні напрямки розвитку технології виготовлення та складання машин і приладів в різних галузях народного господарства.

Адреса організаційного комітету:

Україна, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, Луцький національний технічний університет, технологічний факультет, кафедра приладобудування.

Телефон: (0332) 26-49-43

Факс: (0332) 74-48-40

e-mail: confkptm@gmail.com

© Луцький національний технічний університет, 2018 р.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Савчук Петро Петрович, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Марчук Віктор Іванович, д.т.н., професор, Луцький НТУ (відповідальний редактор)
Заблоцький Валентин Юрійович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Шваб'юк Василь Іванович, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Шабайкович Віктор Антонович, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Григор'єва Наталія Сергіївна, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Ярошевич Микола Павлович, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Андрущак Ігор Євгенович, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Пастернак Ярослав Михайлович, д.ф.-м.н., доцент, Луцький НТУ
Скоропад Пилип Ізидорович, д.т.н., професор, Національний університет «Львівська політехніка»
Грицай Ігор Євгенович, д.т.н., професор, Національний університет «Львівська політехніка»
Захаров Ігор Петрович, д.т.н., професор, провідний науковий співробітник ННЦ «Інститут метрології»
Ларшин Василь Петрович, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет
Федосов Сергій Анатолійович, д.ф.-м.н., професор СНУ імені Лесі Українки
Гулай Любомир Дмитрович, д.х.н., професор СНУ імені Лесі Українки
Гераїмчук Михайло Дем'янович, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Антонюк Віктор Степанович, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Тимчик Григорій Семенович, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Куц Юрій Васильович, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Лебедев Володимир Георгійович, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет
Тонконогий Володимир Михайлович, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет
Коломісць Леонід Володимирович, д.т.н., професор, Одеська державна академія технічного регулювання та якості
Ткачук Роман Андрійович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Яворський Богдан Іванович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Ляшук Олег Леонтійович, д.т.н., доцент, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Гевко Богдан Матвійович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Пилипець Михайло Ількович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Васильків Василь Васильович, д.т.н., доцент, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Луців Ігор Володимирович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Пермяков Олександр Анатолійович, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Харківський політехнічний інститут»
Новіков Федір Васильович, д.т.н., професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
Джугурян Тигран Герасимович, д.т.н., професор, Щецинська морська академія (Польща)
Станіслав Іван, д.т.н., професор, декан, Щецинська морська академія (Польща)
Мірослав Пайор, д.т.н., професор, Західнопоморський технічний університет в м. Щецин (Польща)
Збігнєв Матушак, д.т.н., професор, Щецинська морська академія (Польща)
Даріуш Тарнаповіч, д.т.н., професор, Щецинська морська академія (Польща)
Марек Опеляк, д.т.н., ректор, Любленська політехніка (Польща)
Антоній Свіць, д.т.н., професор, Любленська політехніка (Польща)
Гулай Ольга Іванівна, д.п.н., доцент, Луцький НТУ
Лапченко Юрій Сергійович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Денисюк Віктор Юрійович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Симонюк Володимир Павлович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Пташенчук Віталій Віталійович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Яцинський Леонід Васильович, к.ф.-м.н., доцент, Луцький НТУ
Луцьков Сергій Валентинович, к.ф.-м.н., доцент, Луцький НТУ
Марчук Ірина Вікторівна, к.т.н., доцент, Луцький НТУ (відповідальний секретар)

ЗМІСТ

Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб. Дослідження та розробка методів стандартних і спеціальних випробувань матеріалів на опір безударному абразивному зношуванню.....	6
Божко Т.Є., к.т.н., Гальчук Т.Н., к.т.н. Вплив умов різання на залишкові напруження 1 роду при токарній обробці пористого матеріалу.....	17
Verba I., Ph.D., Danylenko O., Ph.D., Yakhno A., bachelor, master's student Machine-building technical exclusion: trends, perspectives, ways.....	23
Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н. Балансування обертових інструментальних систем: багато питань і деякі відповіді.....	30
Гевко Ів.Б., д.т.н., проф., Гудь В.З., к.т.н., Круглик О.А. Синтез способів навивання спіралей шнеків.....	39
Глухова Н.В.¹, Пісоцька Л.А.² Інформаційна технологія для аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання	48
Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф. Проектування технологічних модулів роботизованого складання.....	53
Гулієва Н.М., к.т.н., Булига В.Р. Особливості автоматизованого проектування процесу лиття.....	57
Данильчук С.П., м.н.с. Одержання та фотоелектричні властивості твердих розчинів $tl_{1-x}in_{1-x}sn_xse_2$ ($x=0,1-0,25$)	62
Замуруєва О.В., к.ф.-м.н., Кевшин А.Г., к.ф.-м.н., Коровицький А.М., к.ф.-м.н., Федосов С.А. д.ф.-м.н. Підвищення фотопровідності кристалів халькогеніду індинату талію ($tlinse_2$)	67
Караченцев В.С., Денисюк В.Ю., к.т.н. Основні властивості і характеристики аналогових сигналів.....	72
Kisil T. Yu., Ph.D., associate professor, Kynytska L.G., Ph.D., associate professor, Tuz V.V., Ph.D., associate Professor Specifying the form of immersion probe in the piezoelectric liquid viscosimeters for improving measurement accuracy.....	77
Корбут Є.В., канд.тех. наук, доцент Особливості обробки вПКМ процесом різанням	82
Коробко А. І., канд. техн. наук, доц. Оцінювання впливу випадкової і методичної похибок на результат вимірювання (в порядку обговорення)	87
Кримусь А.С., Мирончук Г.Л., к.ф.м.н., Хмарук Г.П., м.н.с, Мирончук Д.Б., студ. П'єзоелектричні сенсори на основі халькогенідних монокристалів $aggage_3se_8$	93
Лебедев В.Г., д.т.н., проф., Фроленкова О.В., асистент Имитационное моделирование процесса шлифования термобарьерного покрытия zr_2o_3 кругами из синтетических сверхтвердых материалов.....	97
Ляшук О. Л. д. т. н, доц., Дячун А.Є. к. т. н. доц, О.Л. Третьяков Дослідження деформації заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок пристроєм із декількома різцями.....	105
Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н. Технологічне забезпечення точності та якості поверхонь обертання в підшипниковому виробництві.....	111
Махновець Г.В., м.н.с., Мирончук Г.Л., к.ф.м.н., Піскач Л.В., к.х.н., Федосов С.А., д.ф.м.н. Електричні та фотоелектричні властивості кристалів $tl_{1-x}ga_{1-x}sn_xse_2$ ($x=0,05; 0,1$)	119
Равська Н.С., д.т.н., проф., Парненко В. С., асистент Визначення мінімального допустимого діаметра дискової обкатної фрези при обробцівідрізних пил з нерівномірним кроком.....	124
Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю. Програмно-апаратне забезпечення симуляторів руху на основі приводів просторового	

компонування.....	130
Рудик В.Ю., Терещенко М.Ф., Рудик Т.О. Розподіл магнітної індукції на індукторах апарату фізіотерапії «мит-11т»	138
Симонюк В.П., к.т.н., Денисюк В.Ю., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Красовський В.В. Дослідження залежностей режимів вібрування на рух робочого середовища при вібраційній обробці.....	143
Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстоплот О.С. Удосконалена радіоелектронна система для тренувань біатлоністів.....	150
Тимчик Г. С., д.т.н., професор, Вислоух С. П., к.т.н., доцент, Матвієнко С. М., асистент Контроль складу речовин за допомогою «методу теплопровідності»	157
Ткачук А.А., к.т.н., Терлецький Т.В., к.т.н., доцент, Кононенко А.С. Розроблення інструменту для поверхневого пластичного деформування з можливістю застосування індуктивних давачів для активного контролю процесу оброблення.....	165
Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н. Притяжение немагнитных металлов в технологиях магнитно-импульсной обработки металлов.....	173
Швец С. В., к.т.н., Криворучко Д. В., д.т.н. Особенности конструирования протяжек з використанням cad/cam-систем.....	179
Яремчук Н. А. к.т.н. проф., Годя О. Ю. Спосіб підвищення точності оцінювання комплексного показника якості складних об'єктів за їх ординальними властивостями.....	185

УДК 621.791:621.926

Лебедев В.Г., д.т.н., проф., Фроленкова О.В., ассистент
Одесский национальный политехнический университет

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ZrO_2 КРУГАМИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Предметом исследования является математическое моделирование процесса шлифования напылённого керамического слоя на основе диоксида циркония при шлифовании алмазными и эльборовыми кругами, для обеспечения (получения) бездефектной поверхности термобарьерного слоя, с целью избежания отслаивания напылённого слоя от металла детали (изделия). Показано, что наилучшие значения остаточных напряжений ($G=4,1 \cdot 10^8$ Па), при величине максимальной контактной температуры приблизительно равной 280°C на поверхности термобарьерного покрытия достигаются, при шлифовании эльборовым кругом ЛО 250/160 С10 100% (Nz25). Значения расчётных величин контактных температур и остаточных напряжений при углублении внутрь слоя по Y, при обработке как алмазным так и эльборовым кругами понижаются и начиная с глубины $Y=6,5 \cdot 10^{-4}$ мм, остаются без особых изменений. И эти показатели наилучшие при зернистости круга АС4 250/160 В2-01 100% и ЛО 250/160 С10 100% (Nz25)

Ключевые слова: диоксид циркония, теплозащитное покрытие, контактные температуры.

Введение. Широкое применение различного вида покрытий в современной промышленности, обусловлено решением поставленных задач по улучшению эксплуатационных характеристик деталей, например, камер сгорания, систем трубопроводов и сопловой направляющего аппарата, газотурбинные лопатки и т.д. Термобарьерные покрытия нанесенные газотермическими методами, а именно: плазменным, газопламенным и газодинамическим напылением, электродуговой металлизации, плазменной и лазерной наплавки придают поверхности металлов повышенные твердость, термостойкость, антикоррозионные и многие другие свойства.

В частности, для увеличения срока службы рабочей поверхности турбинных лопаток, защиты от высокотемпературной газовой коррозии и высокого градиента температур, наносятся термобарьерные покрытия (ТВС) с помощью газопламенного напыления. В качестве теплового барьера чаще всего применяют оксид циркония стабилизированный оксидом иттрия.

На сегодняшний день применяется два основных метода – атмосферное плазменное напыление APS и электроннолучевое вакуумное плазменное нанесение EB-PVD керамических покрытий на металлические основания.

Любой метод не обеспечивает необходимую точность и заданную шероховатость поверхности. Все это вызывает необходимость после напыления проводить шлифование для достижения упомянутых параметров.

Однако, процесс шлифования характеризуется высокими контактными температурами, которые могут вызывать трещины напыленного слоя при шлифовании и после него. Возможно, проникновение теплового поля значительной температуры на границу раздела: напыленный слой – основной металл, что может привести к отслаиванию напыленного слоя из-за различия в коэффициентах теплового расширения напыленного слоя и основного металла. Оксид циркония обладает большим преимуществом, поскольку его коэффициент теплового расширения близок к коэффициенту теплового расширения большинства металлов. Это обстоятельство существенно уменьшает остаточные напряжения на границе покрытие-металл, что значительно снижает риск отслаивания термобарьерного слоя при шлифовании.

Кроме того, теплопроводность термобарьерного покрытия очень низкая и можно ожидать низких температур на границе раздела покрытие-металл.

Однако, сравнительно большие коэффициенты теплового расширения могут способствовать возникновению высоких остаточных напряжений, которые могут привести к трещинам напыленного слоя, повторному напылению с перешлифовкой. Следовательно, основным лимитирующим фактором при шлифовании напыленного термобарьерного слоя, является контактная температура шлифования.

В настоящее время нет базы данных по назначению режимов шлифования кругами из КНБ и СА, которые бы обеспечивали бездефектный поверхностный слой после обработки.

Поскольку экспериментальные исследования температуры весьма трудоемкие, целесообразно математически промоделировать процесс шлифования, чтобы математически создать эту базу и в дальнейшем с помощью немногочисленных экспериментов уточнить математическую модель.

Цель работы – разработка математической модели шлифования покрытий из оксида циркония, кругами из КНБ и СА и математическое моделирование процесса шлифования с целью определения контактных температур шлифования не вызывающих дефектов поверхностного слоя.

Объект исследования – процесс шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами.

Предмет исследования – шлифование керамического термобарьерного покрытия из ZrO_2 .

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Определить силы резания единичным зерном.
2. Определить тепловую мощность, развиваемую единичным зерном при резании термобарьерного слоя.
3. Определить величину теплового потока возникающего в пятне контакта круга с деталью путем суммирования тепловых потоков от единичных зерен.
4. Разработать алгоритм, блок-схему и саму программу расчетов (в среде MathCad), которая дает возможность определить суммарные силы резания, контактные температуры шлифования термобарьерного покрытия, глубину проникновения теплового поля контактной температуры.
5. Определить величину остаточных напряжений на поверхности покрытия, по толщине покрытия и на границе покрытие-металл.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В статье [1] приводятся сведения о влиянии кислорода на теплофизические свойства циркония и циркониевых сплавов: температуру плавления, температуру аллотропических превращений, теплоёмкость, теплопроводность, плотность и коэффициент линейного расширения.

Авторы работы [2] исследуют возможность применения оптических методов неразрушающего контроля теплозащитных керамик в промышленных условиях. Были исследованы спектральные характеристики объемной Al_2O_3 керамики и ZrO_2 покрытия, применяемых для тепловой защиты в энергетической промышленности. Изучались возможности применения к защитным Al_2O_3 и ZrO_2 керамикам различных оптических методов неразрушающего контроля (визуальные методы, методы зондирования, методы анализа углового спектра рассеяния, методы анализа динамики спекл-изображений). После проведения ряда экспериментов было установлено, что более полную информацию о качестве керамики можно получить из анализа динамики спекл-изображений.

В работе [4] с целью улучшения качества сцепления покрытия с материалом подложки и снижения пористости, приводятся результаты исследования макроструктуры и микротвердости плазменных покрытий, подвергнутых электромеханическому упрочнению.

Целью работы [7] было исследование влияния исходных материалов на структуру и свойства теплозащитного покрытия. Авторами исследовался порошок окиси циркония стабилизированный иттрием в исходном состоянии, после обработки плазмой и образцы теплозащитного покрытия, полученные из порошков разного фракционного состава.

В обзоре представленной литературы рассматривались вопросы связанные с исследованием макроструктуры и микротвердости плазменных покрытий, подвергнутых электромеханическому упрочнению; возможностью применения оптических методов неразрушающего контроля теплозащитных керамик; исследование влияния исходных материалов на структуру и свойства теплозащитного покрытия и, о влиянии кислорода на теплофизические свойства циркония и циркониевых сплавов, но не обсуждалась проблема последующей механической обработки напыленного керамического слоя из оксида циркония, следовательно, исследования в настоящей работе представляют собой новизну и актуальность.

3. Материалы и методы исследований. Исследования проведены с применением математического моделирования. В качестве материала используется оксид циркония, в

качестве режущего инструмента шлифовальные круги из синтетических сверхтвердых материалов.

4. Аналитические и экспериментальные исследования. Шлифование характеризуется такими специфическими особенностями, как: силы резания при снятии отдельных стружек абразивными зёрнами; толщина слоя, снимаемого одним абразивным зёрном; тепловые явления - мгновенные и контактные температуры. [6].

Для того, чтобы определить контактную температуру шлифования необходимо знать тепловую мощность, которая образуется в пятне контакта круга с деталью. Указанная тепловая мощность Q , является суммой тепловых мощностей зёрен круга, которые одновременно работают в зоне контакта, следовательно, схема расчета должна быть такая:

1. Средняя величина тепловой мощности отдельного режущего зёрна, зависящая от средней толщины стружки снимаемой зёрном.
2. Количество зёрен, одновременно работающих в пятне контакта.
3. Суммирование этих величин, что дает суммарный тепловой импульс.

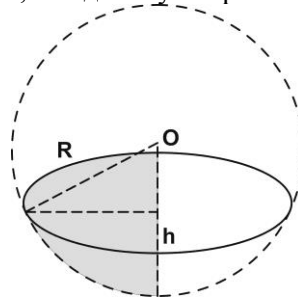


Рис. 1. Площадь половины контакта шарового сектора с металлом

Режущие зёрна на смотря на то, что они заострены, имеют радиусы закругления, поэтому если принять модель зёрна с радиусом закругления в виде части шаровой поверхности, то при углублении зёрна в металл на некоторую величину h , мы получим площадь половины контакта шарового сектора с металлом (рис.1):

$$\frac{1}{2}S = 2\pi Rh \quad (1)$$

Напряжение скалывания, определяется как:

$$G_{\text{скалывания}} = \frac{P_{Z_{ед}}}{\frac{1}{2}S} = \frac{2P_{Z_{ед}}}{S}, \quad (2)$$

Следовательно, тангенциальная сила резания единичным зёрном равна:

$$P_{Z_{ед}} = G_{\text{скалывания}} \times \frac{1}{2}S, \quad (3),$$

а произведение $P_{Z_{ед}}$ на скорость вращения круга, будет равно тепловой мощности, которую развивает единичное зёрно:

$$q = P_{Z_{ед}} \times V_{KP}, \quad (4).$$

Однако, для того чтобы определить q , тепловую мощность от единичного зёрна необходимы надежные данные по G скалывания, которых для оксида циркония в литературе нет. Поэтому, для определения тепловой мощности q , была использована методика С.Г. Редько, [5] которая основывается на вдавливании алмазной пирамидки на определенную глубину.

Так как для создания модели источника тепла, в первую очередь необходимо знать единичную силу P_Z , которая достаточно точно определяется при шлифовании металлических сплавов по значению предела прочности на растяжение и сдвиг, и по величине площади контакта зёрна с металлом. Применяя вышеупомянутую методику, предложенную С.Г. Редько, дало возможность по величине углубления зёрна в металл определять величину P_Z , как $0,55P_Y$. В результате получается простая зависимость (2):

$$P_Z(t) = 7,15 \times H_V \times h(t)^2 \times k_d, \quad (5)$$

В результате расчетов, проведенных по формуле (4), мы получаем, что тепловая мощность от единичного зерна, имеет величину до $q=103,16$ Вт. Это обуславливает высокую плотность суммарного теплового потока в зоне шлифования.

Учитывая, величины коэффициента тепловой активности керамики ZrO_2 (т.е. термобарьерного покрытия):

$$\varepsilon_{кер} = 3,3 \times 10^3, \frac{Дж}{м^2 Сс^{0,5}} \quad (6)$$

и коэффициента тепловой активности комплекса (зерно+связка)

$$\varepsilon_{кер} = 8,55 \times 10^3, \frac{Дж}{м^2 Сс^{0,5}} \quad (7),$$

были получены расчетные значения теплового потока $Q(t)$, который переходит в шлифуемую деталь, представлены (табл. 1).

Таблица 1

Величина плотности теплового потока Q в зависимости от изменения глубины шлифования t , при режимах $V_{кр}=30$ м/с, $V_{д}=1/6$ м/с, $Sp=0,001$ м/об, круг ЛО 180/150V1 100%

t , мм	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
$Q(t)$, Вт/м ²	$4,3 \cdot 10^6$	$0,86 \cdot 10^7$	$1,29 \cdot 10^7$	$1,72 \cdot 10^7$	$2,15 \cdot 10^7$	$2,58 \cdot 10^7$

Анализируя расчетные данные, можно сказать, что с уменьшением глубины шлифования, величина плотности теплового потока уменьшается.

Алгоритм расчета представлен на рисунке 2. Алгоритм дает возможность определить: суммарные силы резания, контактную температуру шлифования термобарьерного слоя и глубину проникновения теплового поля контактной температуры.

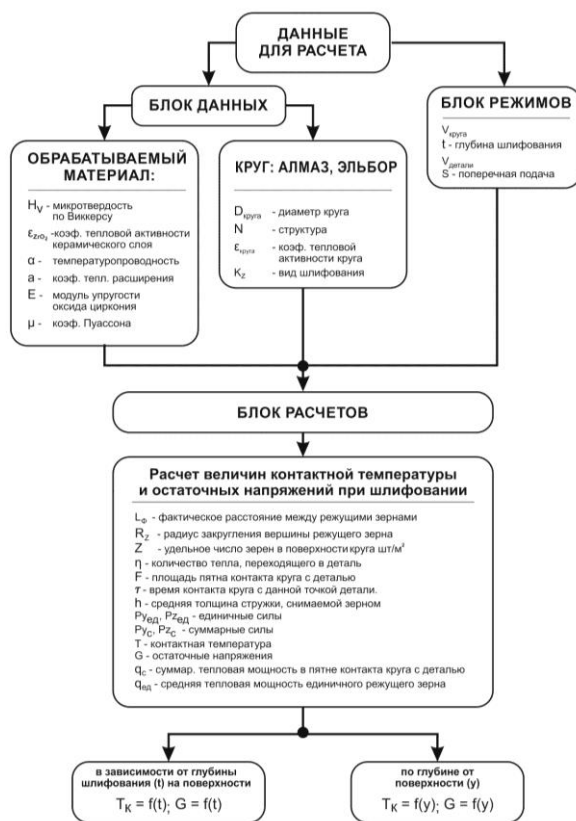


Рис. 2 Алгоритм расчетов для аналитического анализа температурного процесса при шлифовании термобарьерного покрытия и оценки напряженного напыленного слоя после шлифования

Перед запуском расчетной части программы, производится загрузка данных характеризующих обрабатываемый материал, шлифовальный круг и режимы обработки. Далее идет блок расчетов, в котором рассчитываются величины контактных температур T_k и остаточных напряжений G на поверхности в зависимости от глубины шлифования (t) и в глубину от поверхности шлифования по координате (y).

В этом же блоке, определяются значения величин $P_{Yед}$ и $P_{Zед}$ и, соответственно, значения суммарных сил $P_{Yс}$ и $P_{Zс}$. Это дает возможность рассчитать значение суммарной тепловой мощности в пятне контакта круга с деталью q_c . Расчеты производились для кругов: синтетический алмаз –

AC4 125/100 B2-01 100% (Nz12),
AC4 160/125 B2-01 100% (Nz16),
AC4 250/160 B2-01 100% (Nz25);

и КНБ

ЛО 125/100 C10 100% (Nz12),
ЛО 160/125 C10 100% (Nz16),
ЛО 250/160 C10 100% (Nz25).

Данный алгоритм был реализован в программе MatCad. В результате расчетов получены следующие данные:

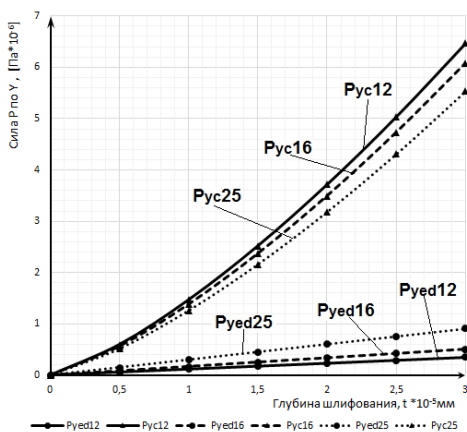


Рис. 3. Значения сил P_{Yed} и P_{YC} в зависимости от глубины шлифования кругами АС4 125/100 В2-01 100% (Nz12), АС4 160/125 В2-01 100% (Nz16), АС4 250/160 В2-01 100% (Nz25)

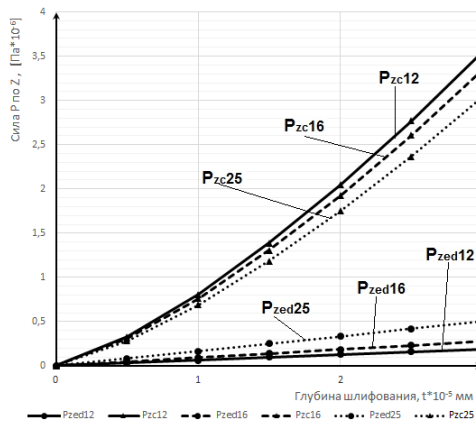


Рис. 4. Значения сил P_{Zed} и P_{ZC} в зависимости от глубины шлифования кругами КНБ ЛО 125/100 С10 100% (Nz12), ЛО 160/125 С10 100% (Nz16), ЛО 250/160 С10 100% (Nz25)

Анализируя полученные графики, приведенные на рисунке 3, можно отметить, что при углублении зерна в термобарьерное покрытие единичная сила P_{Yed} при изменении величины зернистости круга N12, N16, N25 при шлифовании как алмазным, так и эльборовым кругами увеличивается, соответственно и суммарные силы P_{YC} увеличиваются. Оптимальными величинами при расчетах получают значения при шлифовании алмазным кругом с зернистостью N16, потому что они естественно усредняют значения получаемые при использовании зернистости N12 и N25. Соответственно полученные аналитическим путем единичная и суммарная силы P_{ZC} и P_{Zed} (рисунок 4) тоже оптимальные при шлифовании алмазным кругом с зернистостью N16.

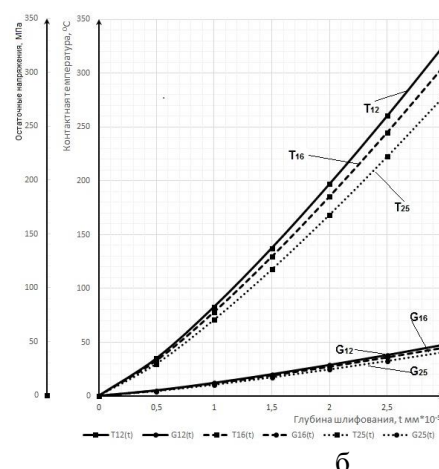
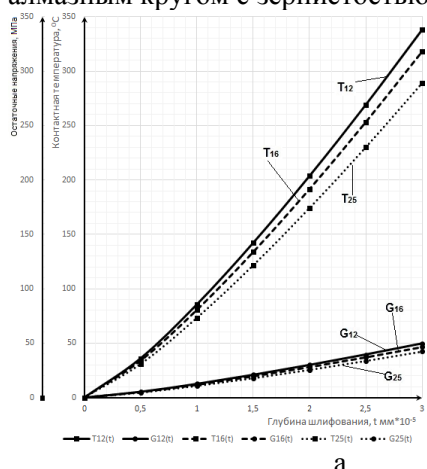


Рис. 5. Значения контактных температур и напряжений на поверхности при шлифования кругами АС4 125/100 В2-01 100% (Nz12), АС4 160/125 В2-01 100% (Nz16), АС4 250/160 В2-01 100% (Nz25) (а) и ЛО 125/100 С10 100% (Nz12), ЛО 160/125 С10 100% (Nz16), ЛО 250/160 С10 100% (Nz25) (б)

На рисунке 5 (а, б) получены зависимости значений контактных температур $T(t)$ и остаточных напряжений $G(t)$ на поверхности шлифования кругами АС4 125/100 В2-01 100% (Nz12), АС4 160/125 В2-01 100% (Nz16), АС4 250/160 В2-01 100% (Nz25) (а) и ЛО 125/100 С10 100% (Nz12), ЛО 160/125 С10 100% (Nz16), ЛО 250/160 С10 100% (Nz25) (б), можно отметить, что при шлифовании эльборовым кругом с зернистостью Nz25 значения максимальной контактной температуры приблизительно равны 280°C и соответственно при этой температуре, при шлифовании на глубину $3 \cdot 10^{-5}$ мм, наименьшее расчетное значение остаточного напряжения будет равно, $G=4,1 \cdot 10^8$ Па.

Анализируя значения контактных температур и значения остаточных напряжений можно сделать вывод, что при выбранных режимах шлифования контактные температуры не

вызывают значительных остаточных напряжений, которые могли бы привести к образованию трещин.

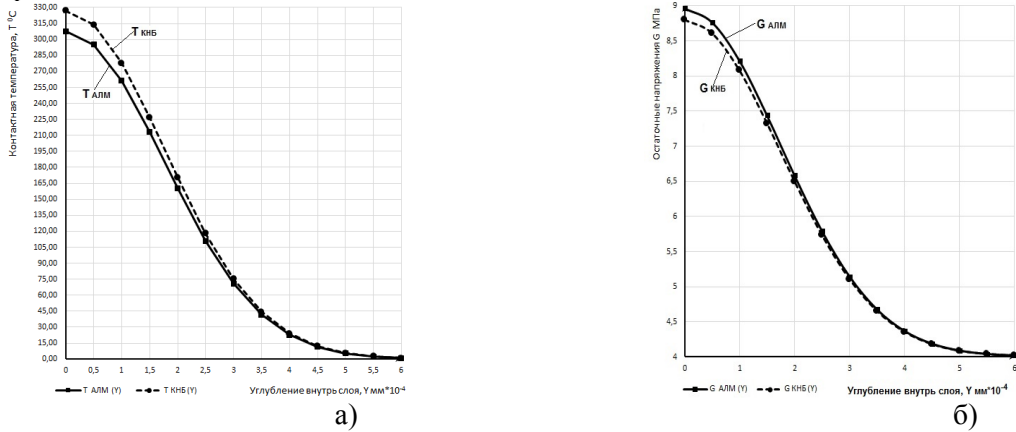


Рис. 6. Значения контактных температур (а) и остаточных напряжений (б) на величину углубления внутрь прошлифованного слоя Y, при шлифования кругами AC4 125/100 B2-01 100% (Nz12) и ЛО 125/100 C10 100% (Nz12)

Далее проанализируем результаты аналитических расчетов, изображенных на рисунках 6–8. Графически показано, что при углублении внутрь слоя по Y, значения контактных температур T(Y) и остаточных напряжений G(Y) как при обработке алмазным кругом, так и при эльборовом понижается и остается практически без изменений начиная со значения $Y = 6,5 \cdot 10^{-4}$ мм. Наилучшие результаты получены при величине зернистости шлифовального круга Nz25.

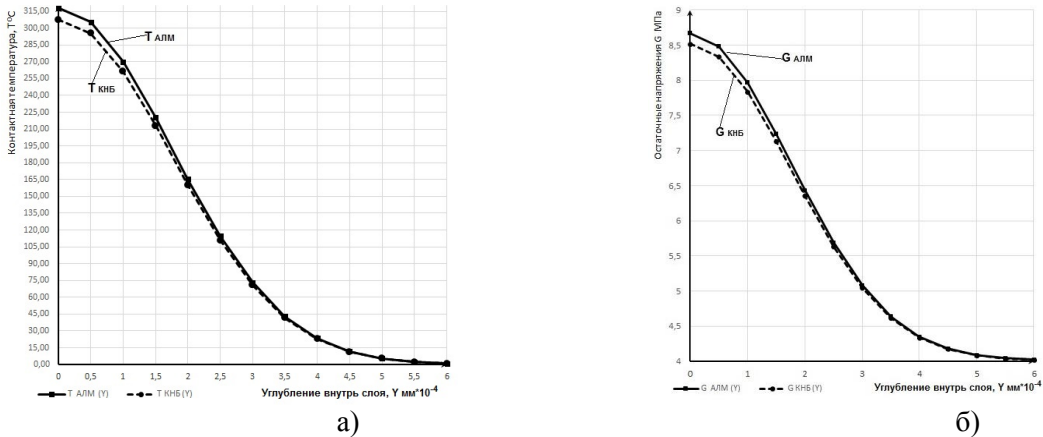


Рис. 7. Значения контактных температур (а) и остаточных напряжений (б) на величину углубления внутрь прошлифованного слоя Y при шлифования кругами AC4 160/125 B2-01 100% (Nz16) и ЛО 160/125 C10 100% (Nz16)

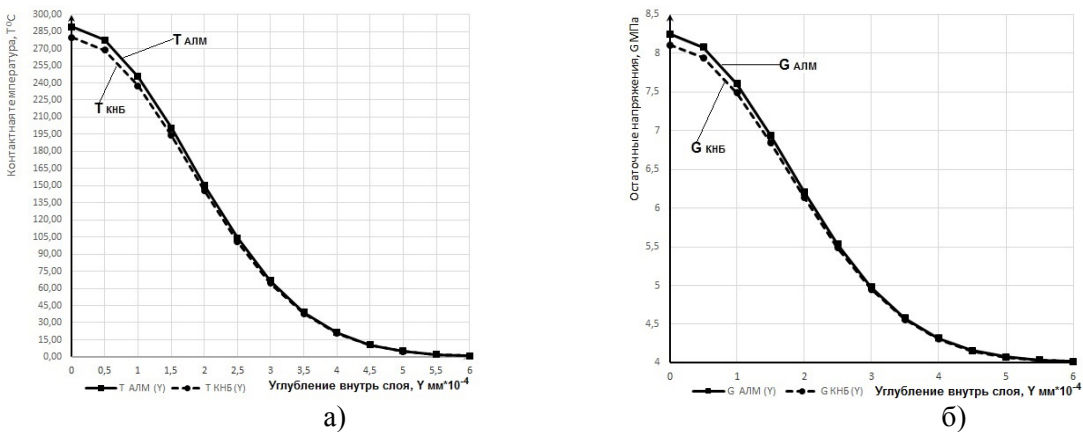


Рис. 8. Значения контактных температур (а) и остаточных напряжений (б) на величину углубления внутрь прошлифованного слоя Y при шлифования кругами AC4 250/160 B2-01 100% (Nz25) и ЛО 250/160 C10 100% (Nz25)

Данные расчетов показывают, что на нижней кромке напыленного термобарьерного слоя температуры, соответствуют температуре окружающей среды, а величина остаточных напряжений настолько мала, что не может вызвать отслаивание напыленного слоя.

Обсуждение результатов. При анализе данных полученных расчетным путем, можно сказать, что знание оптимальных значений сил резания P_{Yed} P_{YC} P_{Zed} P_{ZC} , дает возможность рассчитать допустимые значения контактных температур и величины остаточных напряжений при выбранных режимах шлифования.

Контактная температура является наиболее важным фактором, она распространяется вглубь шлифуемой поверхности, разогревая ее, что может вызывать появление значительных остаточных напряжений в напыленном слое.

Наше исследование показывает, что шлифование алмазными и эльборовыми кругами с указанными выше зернистостями и с теми режимами, которые используются при обработке, является безопасным технологическим процессом, как для термобарьерного слоя, так и для основного металла, на который данный термобарьерный слой напылен.

Выводы

1. При расчете значений единичных сил P_{Yed} и P_{Zed} и суммарных сил P_{ZC} и P_{YC} в зависимости от глубины шлифования, получены оптимальные значения при шлифовании алмазным кругом с зернистостью Nz16 (AC4 160/125 B2-01 100%).

2. Произведенный аналитический расчет при глубине шлифования $3 \cdot 10^{-5}$ мм, обработка эльборовым кругом ЛО 250/160 C10 100% с зернистостью Nz25 на поверхности термобарьерного покрытия, дает наилучшие значения остаточных напряжений, $G=4,1 \cdot 10^8$ Па при величине максимальной контактной температуры приблизительно равной 280°C , т.е. при этой температуре остаточные напряжения будут наименьшие.

3. При расчете величин контактных температур и остаточных напряжений при углублении внутрь слоя по Y, при обработке как алмазным так и эльборовым кругами значения контактных температур и остаточных напряжений понижаются и начиная с глубины $Y=6,5 \cdot 10^{-4}$ мм, остаются без особых изменений. И эти показатели наилучшие для круга AC4 250/160 B2-01 100% при зернистости Nz25 и ЛО 250/160 C10 100% при зернистости Nz25.

4. Результаты исследования показывают, что шлифование алмазными и эльборовыми кругами термобарьерных покрытий при исследованных в настоящей работе режимах, является приемлемым технологическим процессом, который обеспечивает бездефектную поверхность термобарьерного слоя и исключает его отслаивание от основного металла детали.

Список использованных источников

1. Черняева Т.П. Теплофизические свойства сплавов цирконий-кислород / Т. П. Черняева, А. И. Стукалов, В. М. Грицина // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика и технология конструкционных материалов». 2002, №1, с. 106-111.

2. Ропот П. И., Васильев Р. Ю. Дефектоскопия ZrO_2 покрытий и объемных Al_2O_3 керамик оптическим методом / Веснік МДПУ імя І. П. Шамякіна. Серія «Фізика» г.Мозырь, Гомельская обл., – 2007. – № 1(16). – С.14-20.

3. Н.Н.Клименко, В.Г.Лебедев, и др. Методика измерения температур шлифования термопарами при обработке наплавленных и напыленных поверхностей машиностроительных деталей. Физические и компьютерные технологии (Труды 20-й Международной научно-практической конференции, 23-24 декабря 2014). – Д: ЛИРА. – Харків, 2015. – С. 34-38.

4. Багмутов В. П. Исследование микротвердости плазменных покрытий после электромеханической обработки / В. П. Багмутов, В. И. Калита, И. Н. Захаров, С. Н. Паршев // Известия ВолгГТУ. – 2007. – № 5. – С.125-130.

5. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С.Г.Редько. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1986. – 231 с.

6. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н.Маслов. – М. : Машиностроение, 1984. – 320 с.

7. Мельников А.А., Христосова В.Ю. Исследование влияния размеров частиц исходного порошка окиси циркония на структуру и свойства теплозащитного покрытия на деталях ГТД / Известия Самарского научного центра РАН 2015 . – № 6-3(17). – С.683-685.

В.Г. Лебедєв д.т.н., проф., О.В. Фроленкова асистент
Одеський національний політехнічний університет

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРИТТЯ ZrO_2 КОЛАМИ З СИНТЕТИЧНИХ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Предметом дослідження є математичне моделювання процесу шліфування напиляним керамічного шару на основі діоксиду цирконію при шліфуванні алмазними і ельборовими колами, для забезпечення (отримання) бездефектної поверхні термобар'єрного шару, з метою уникнення відшаровування напиляним шару від металу деталі (вироби).

Показано, що найкращі значення залишкових напружень ($G = 4,1 \cdot 10^8$ Па), при величині максимальної контактної температури приблизно 280°C на поверхні термобар'єрного покриття досягаються, при шліфуванні ельборовим кругом ЛО 250/160 С10 100% (Nz25).

Значення розрахункових величин контактних температур і залишкових напруж при поглибленні всередину шару по Y, при обробці як алмазним так і ельборовим колами знижуються і починаючи з глибини $Y = 6,5 \cdot 10^{-4}$ мм, залишаються без особливих змін. І ці показники найкращі при зернистості круга АС4 250/160 В2-01 100% і ЛО 250/160 С10 100% (Nz25)

Ключові слова: діоксид цирконію, теплозащитное покриття, контактні температури.

V.G. Lebedev doctor of technical sciences, prof., O.V. Frolenkova assistant
Odessa National Polytechnic University

IMITATION MODELING OF THE GRINDING PROCESS OF ZrO_2 THERMAL BARRIER COATING BY CIRCLES OF SYNTHETIC SUPERHARD MATERIALS

The subject of the study is the mathematical simulation of the grinding process of a sprayed ceramic layer based on zirconium dioxide when grinding with diamond and borazon circles to provide a defect-free surface of the thermobarrier layer, in order to avoid flaking of the sprayed layer from the metal of the component (product).

It is shown that the best values of residual stresses ($G=4.1 \cdot 10^8$ Pa), with a maximum contact temperature of about 280°C on the surface of the thermobarrier coating, are achieved when grinding by the borazon circle LO 250/160 C10 100% (Nz25).

The values of the calculated values of contact temperatures and residual stresses when deepening inside of the layer along Y, during processing by both diamond and borazon circles decrease and starting from a depth $Y=6.5 \cdot 10^{-4}$ mm remain unchanged. And these figures are the best with the grain size of the circle АС4 250/160 В2-01 100% and ЛО 250/160 С10 100% (Nz25).

Key words: zirconia, thermal protective coating, contact temperatures.

Стаття надійшла до редакції 01.02.2018.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

- Заява на ім'я редакції про те, що стаття не є плагіатом і друкується автором вперше.

Основні наукові напрями:

1. Прилади та системи фізичних та біомедичних технологій.
2. Прогресивні технологічні процеси в машино- та приладобудуванні.
3. Проблеми технологічного менеджменту та сервісного обслуговування медичної техніки.
4. Метрологія, інформаційно-вимірвальні технології, стандартизація та сертифікація.
5. Проблеми, теорія та практика підготовки фахівців технічного спрямування в контексті євроінтеграції вищої школи України.

Статті приймаються в електронному вигляді – за електронною адресою: confkptm@gmail.com, в письмовому вигляді – за поштовою адресою: **43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, каф. Приладобудування (каб. 40)**, відповідальному редактору В.І. Марчуку постійно протягом року.

Редакція здійснює рецензування статей у такій послідовності:

- перевірка статті на відповідність вимогам;
- прийняття рішення щодо прийому статті;
- інформування авторів про можливість *публікації та дозвіл на оплату.*

Статті приймаються українською, російською або англійською мовами. Вартість публікації становить **35 грн.** за 1 стор.

Оплата проводиться за реквізитами:

Картка Приватбанку № 5168 7573 4753 6411

В призначенні платежу слід вказати **«За видання статті у збірнику «Перспективні технології та прилади» від (ПБ)».**

Квитанцію про сплату надіслати у сканованому вигляді за електронною адресою confkptm@gmail.com.

Сайт видання <http://www.ptp.pp.ua>

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (наказ МОН України від 22.12.2016 № 1604 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 13 грудня 2016 року»)

Журнал включено до переліку міжнародних наукових видань за номером ISSN 2313-5352

Видання індексується **Google Scholar**

Видання в національній бібліотеці **імені В.І. Вернадського**

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів можна отримати у технічного секретаря – **Марчук Ірини Вікторівни** за тел. **(0332) 26-49-43, 095-862-18-12**, або за електронною адресою: confkptm@gmail.com.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Комп'ютерний набір: Марчук І.В.
Коректор: Пташенчук В.В.
Технічний редактор: Марчук І.В..
Відповідальний за випуск Марчук В.І.
Друкується в авторській редакції

Здано у виробн. 26.06.2018 р.
Формат 60x84/8. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк арк. 26,5. Обл.-вид. арк."26.2 Тираж 500 пр. Зам. № 59

Віддруковано у інформаційно-видавничому відділі
Луцького національного технічного університету
43018, Україна, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Свідоцтво Держкомтелерадіо ДК №4123 від 28.07.2011 р.