

УДК 621.791:621.926

**В.Г. Лебедев, О.В. Фроленкова***Одесский национальный политехнический университет***ШЛИФОВАНИЕ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ОКСИДА ЦИРКОНИЯ  
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДОМ ИТТРИЯ**

*Предметом исследования является математическое моделирование процесса шлифования напыленного термобарьерного слоя на основе диоксида циркония и диоксида циркония стабилизированного оксидом иттрия при обработке алмазными и эльборовыми кругами. Показаны значения остаточных напряжений (G) и величины контактных температур (T). Проведен сравнительный анализ значений G и T при обработке нестабилизированного и стабилизированного термобарьерного слоя. Показано, что остаточные напряжения G при шлифовании стабилизированного термобарьерного покрытия ниже, чем при шлифовании нестабилизированного термобарьерного слоя. Предлагаемые режимы шлифования термобарьерных покрытий алмазными и эльборовыми кругами не снижают качественных характеристик шлифованного слоя.*

*Ключевые слова:* диоксид циркония, оксид иттрия, термобарьерное покрытие

**В.Г. Лебедев, О.В. Фроленкова****ШЛІФУВАННЯ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРИТТЯ З ОКСИДУ ЦИРКОНІЮ  
СТАБІЛІЗОВАНОГО ОКСИДОМ ІТРИЮ**

*Предметом дослідження є математичне моделювання процесу шліфування напиляного термобар'єрного шару на основі діоксиду цирконію та діоксиду цирконію стабілізованого оксидом ітрію при обробці алмазними та ельборовими колами. Показано значення залишкових напружень (G) і розміру контактних температур (T). Проведено порівняльний аналіз значень G і T при обробці нестабілізованої і стабілізованого термобар'єрного шару. Показано, що залишкові напруги G при шліфуванні стабілізованого термобар'єрного покриття нижче, ніж при шліфуванні нестабілізованого термобар'єрного шару. Пропоновані режими шліфування термо'барьерних покриттів алмазними і ельборовими колами що не знижують якісних характеристик шлифованого шару.*

*Ключові слова:* діоксид цирконію, оксид ітрію, термобар'єрне покриття

**V.G. Lebedev, O.V. Frolenkova****GRINDING THERMOBARRIER COATING FROM ZIRCONIUM OXIDUM STABILIZED BY  
YTTRIUM OXIDE**

*The subject of the study is the mathematical modeling of the grinding process of a sprayed thermal barrier layer based on zirconium dioxide and zirconium dioxide stabilized by yttrium oxide when treated with diamond and borazon wheels. The values of residual stresses (G) and contact temperatures (T) are shown. A comparative analysis of the G and T values was carried out for the treatment of an unstabilized and stabilized thermo-barrier layer. It is shown that the residual stresses G when grinding a stabilized thermo-barrier coating are lower than when grinding an unstabilized thermo-barrier layer. The proposed modes of grinding of thermo-barrier coatings by diamond and borazon wheels do not reduce the quality characteristics of the ground layer.*

*Key words:* zirconia, yttrium oxide, thermal barrier coating

**Введение.** Современное развитие многих областей науки и техники, связано с внедрением новых материалов и высокоэффективных технологических процессов. Во время эксплуатации происходит естественный износ рабочих поверхностей деталей, работающих в условиях повышенных температур и эксплуатационных нагрузок. Поэтому возникает необходимость в защите рабочих поверхностей таких деталей. В настоящее время в промышленности широко применяются термобарьерные покрытия, (на основе диоксида циркония) напыляемые на рабочие поверхности деталей, работающих в высокотемпературной и агрессивной среде, например, газотурбинных лопаток двигателей самолетов.

Известно [1], что диоксид циркония ( $ZrO_2$ ) может существовать в виде трех кристаллических фаз: моноклинной (M), тетрагональной (T) и кубической (C). Наиболее температуроустойчивой является тетрагональная фаза, для сохранения, которой при высоких температурах проводят стабилизацию оксида циркония оксидом иттрия. Стабилизация может быть полной (12%) и частичной (3-6%). На практике при работе в высокотемпературных и агрессивных средах желательно применять частично стабилизированный оксид циркония.

Нанесенные термобарьерные покрытия проходят механическую размерную обработку, для достижения окончательной размерной точности и шероховатости напыленной поверхности. Технологический процесс получения заданной точности обеспечивается путем шлифования. Возникновение высоких контактных температур при шлифовании и значительных значений остаточных напряжений, напыленной поверхности, может приводить к трещинам и отслаиваниям напыленного слоя. Это приводит к необходимости контроля и управления процессом шлифования.

© В.Г. Лебедев, О.В. Фроленкова

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.**

Не смотря на большое количество литературы по термобарьерным покрытиям практически нет сведений о параметрах процесса шлифования (вид круга, связка, зернистость, режимы шлифования), что не дает возможности разрабатывать оптимальную технологию шлифовальной обработки и не гарантирует отсутствие трещин отслаивания напыленного слоя, что является неисправимым браком.

Авторами статьи [2] были проанализированы свойства порошков на различных технологических стадиях и установлены влияние режима обжига на свойства циркониевой керамики, стабилизированной гидрозолем гидроксида иттрия. Целью работы было синтезировать высокопрочную керамику на основе диоксида циркония, стабилизированного гидрозолем гидроксида. Вопрос напыления и обработки шлифованием данного термобарьерного покрытия в статье не рассматривался.

В статье [3] представлены результаты разработки технологии получения высококачественного нанокристаллического порошка композита на основе  $ZrO_2$  в системе  $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2-Al_2O_3$  и нового керамического материала на его основе. Исследованы химический и фазовый составы, микроструктура и физико-механические характеристики разработанной керамики. Показана, высокая теплостойкость разработанного покрытия. Однако в данной статье отсутствуют сведения о поведении данного покрытия при шлифовании.

Авторами статьи [4] экспериментально была подтверждена возможность повышения физико-механических свойств и определен оптимальный режим передрекристаллизационной термической обработки плазменных порошковых теплозащитных покрытий из  $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ . В данной статье отсутствуют сведения процесса шлифования плазменных порошковых теплозащитных покрытий из  $ZrO_2 - 8\% Y_2O_3$ .

В статье [5] показаны особенности алмазного шлифования деталей из керамических материалов и предложены новые направления исследования повышения качества поверхности деталей из керамики. Но, в статье отсутствуют сведения о процессе шлифования, нет значений контактной температуры и не оценена вероятность отслоения напыленного слоя и образования трещин.

Проведенный анализ литературы по напыленным термобарьерным покрытиям, показывает, что необходимо создать нормативную базу данных параметров процесса шлифования обеспечивающих бездефектное состояние прошлифованного напыленного термобарьерного слоя.

Это исследование может быть выполнено за счет применения математического моделирования процесса шлифования и экспериментальной проверке полученных результатов.

**Материалы и методы исследований**

В качестве материалов используются стальные поверхности напыленные частично стабилизированным оксидом циркония.

Для аналитических расчетов используется разработанная математическая модель процесса шлифования [8]. Для исследования прошлифованной поверхности применяется диагностическая система технического зрения [6].

**Цель работы:** создать элементы базы данных для разработки технологического процесса шлифования напыленных термобарьерных покрытий, обеспечивающего высококачественный прошлифованный слой (отсутствие трещин и отслаивания напыленного слоя).

**Задачи исследования:**

1. С помощью математической модели определить контактные температуры шлифования, распространение теплового поля вглубь напыленного слоя
2. Определить остаточные напряжения по толщине напыленного слоя и на границе раздела «термобарьерный слой – металл».
3. Исследовать состояние прошлифованного напыленного слоя с помощью системы технического зрения.
4. Разработать рекомендации по параметрам процесса шлифования, которые целесообразно использовать при шлифовании термобарьерного покрытия.

**Аналитические и экспериментальные исследования**

В принципе, быстро протекающие циклы нагрева и охлаждения могут отрицательно влиять на покрытие – возникновение трещины и отслоение керамического слоя. Поэтому в данной работе были произведены аналитические исследования на предмет сравнения величин контактных температур и остаточных напряжений в прошлифованном слое керамики на основе диоксида циркония и диоксида циркония частично стабилизированного 8% содержанием оксида иттрия.

Известно, что характерными особенностями при шлифовании, являются: силы резания при снятии отдельных стружек абразивными зернами; толщина слоя, снимаемого одним абразивным зерном; тепловые явления – мгновенные и контактные температуры. [7].

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 зерен круга, которые одновременно работают в зоне контакта, следовательно, схема расчета должна быть такая:

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

В статье [8] был представлен алгоритм, который дает возможность определить: суммарные силы резания, контактную температуру шлифования термобарьерного слоя и глубину проникновения теплового поля контактной температуры.

При использовании данного алгоритма расчета с учетом теплофизических характеристик оксида иттрия, были получены значения контактных температур и остаточных напряжений в прошлифованном керамическом слое и построены зависимости, показанные на рис. 1–3.

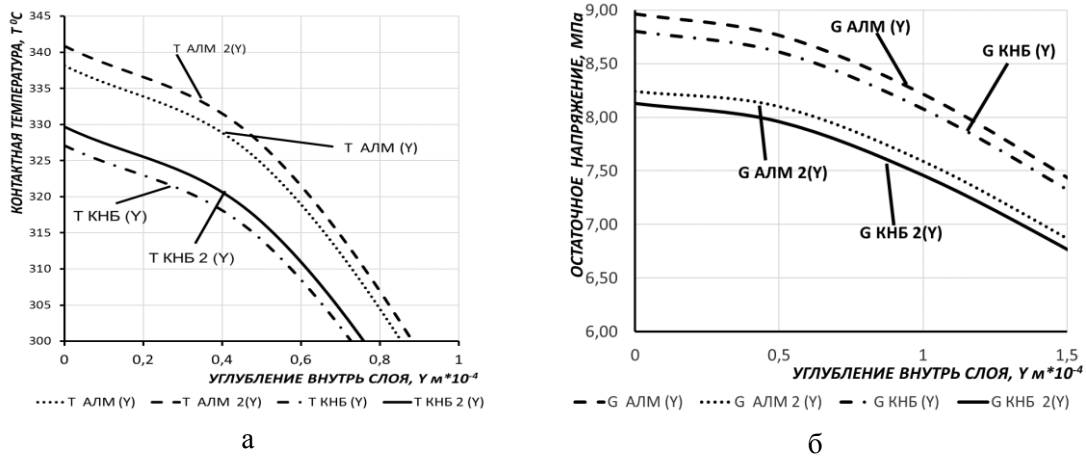


Рис. 1. Значения контактных температур (а) и остаточных напряжений (б) по глубине прошлифованного слоя  $Y$ , при шлифования кругами АС4 125/100 В2-01 100% (Nz12) и ЛО 125/100 С10 100% (Nz12)

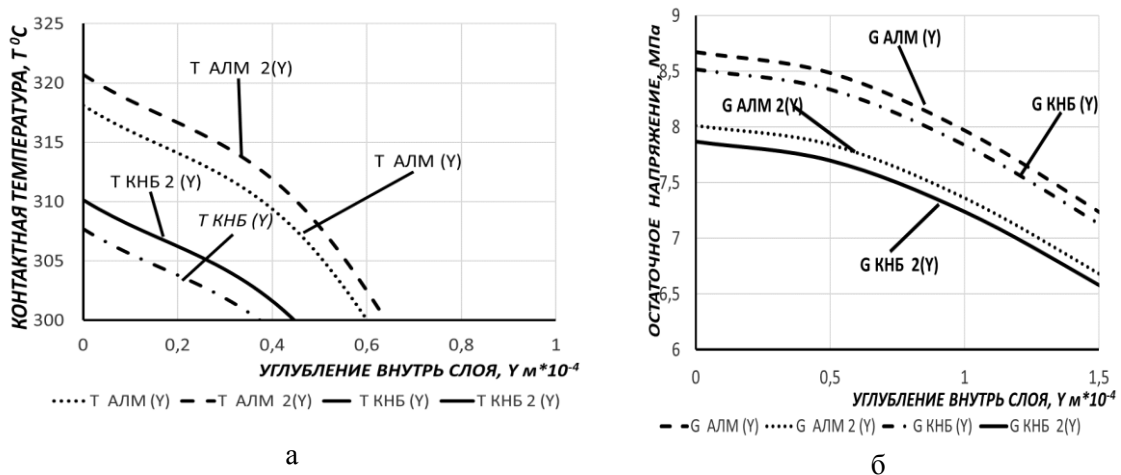
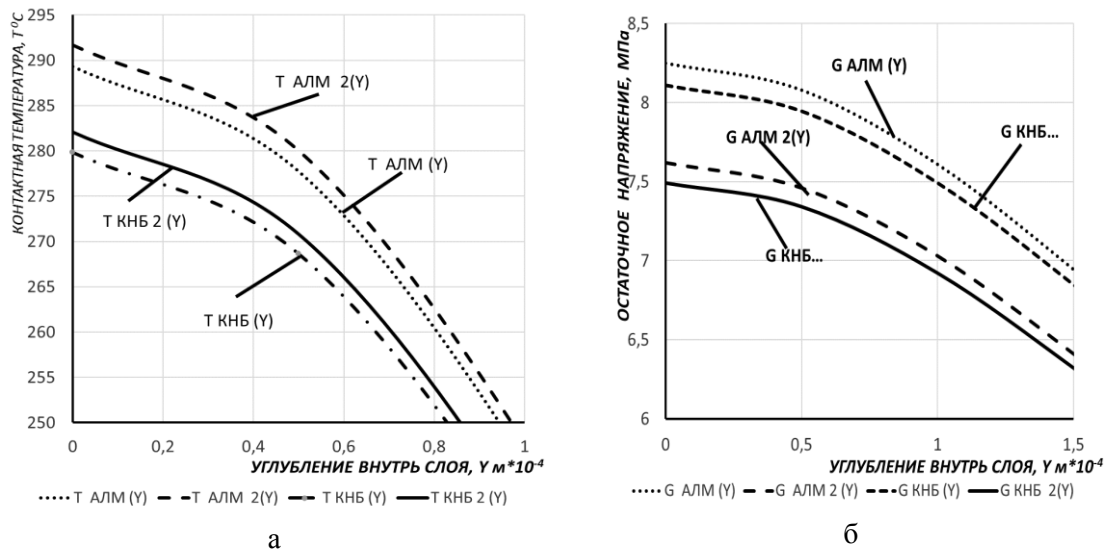


Рис. 2. Значения контактных температур (а) и остаточных напряжений (б) по глубине прошлифованного слоя  $Y$ , при шлифования кругами АС4 160/125 В2-01 100% (Nz16) и ЛО 160/125 С10 100% (Nz16)



**Рис. 3. Значения контактных температур (а) и остаточных напряжений (б) по глубине шлифованного слоя Y, при шлифования кругами 250/160 В2-01 100% (Nz25) и ЛЮ 250/160 С10 100% (Nz25)**

На полученных графиках показаны зависимости величин контактных температур шлифования и остаточных напряжений, от характеристик процесса шлифования (вид материала зерна круга, зернистости, режимов шлифования), по которым можно судить о качестве шлифованного слоя – наличия трещин и вероятности отслаивания напыленного слоя от основного металла.

#### Обсуждение результатов.

При построении графиков в данной работе на основании математических расчетов (моделирования), было отмечено, что при шлифовании керамического покрытия из порошка двуокиси циркония стабилизированного окисью иттрия значения контактных температур и остаточных напряжений наилучшие при зернистости круга Nz25.

Сравнительные расчетные данные значений температур и остаточных напряжений по глубине напыленного слоя приведены в табл. 1

Таблица 1

Значения контактных температур (Т, °С) и остаточных напряжений (G, МПа)	Глубина определения Т, °С и G, МПа, (от поверхности напыленного слоя), мм	ZrO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		AC4 125/100 В2-01 100% (Nz12)		ЛЮ 125/100 С10 100% (Nz12)	
T	0	338.2	340.9	327.1	329.7
G	0	8.96	8.24	8.80	8.13
T	0,5	324.7	324.3	314.0	316.5
G	0,5	8.77	8.1	8.61	7.96
T	1,0	287.2	289.5	277.8	280.0
G	1,0	8.22	7.59	8.08	7.46
		AC4 160/125 В2-01 100% (Nz16)		ЛЮ 160/125 С10 100% (Nz16)	
T	0	318.1	320.7	307.7	310.1
G	0	8.67	8.01	8.52	7.87
T	0,5	305.4	307.9	295.4	297.7
G	0,5	8.48	7.84	8.34	7.7
T	1,0	270.2	272.4	261.3	263.4
G	1,0	7.98	7.36	7.84	7.24

Значения контактных температур (Т, °С) и остаточных напряжений (G, МПа)	Глубина определения Т, °С и G, МПа, (от поверхности напыленного слоя), мм	ZrO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		AC4 250/160 B2-01 100% (Nz25)		ЛО 250/160 C10 100% (Nz25)	
T G	0	289.3 8.25	291.7 7.62	279.8 8.12	282.1 7.49
T G	0,5	277.8 8.08	280 7.46	268.6 7.94	270.8 7.34
T G	1,0	245.7 7.61	247.7 7.03	237.7 7.49	239.6 6.92

Сравнивая показатели контактных температур и остаточных напряжений при шлифовании алмазным кругом термобарьерного покрытия из ZrO<sub>2</sub> и ZrO<sub>2</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при зернистости круга Nz12, можно видеть, что контактная температура Т(У) незначительно повышается, а остаточные напряжения G(У) понижаются в пределах 0,72÷0,63 МПа.

Подобные явления наблюдаются и при шлифовании кругами с зернистостью Nz16 и Nz25. При обработке алмазным кругом с зернистостью Nz16 контактная температура Т(У) повышается, а остаточные напряжения G(У) понижаются в пределах 0,66÷0,62 МПа. И, соответственно, при шлифовании кругом с зернистостью Nz25 контактная температура Т(У) незначительно повышается, а остаточные напряжения G(У) понижаются в пределах 0,63÷0,58 МПа.

Проводя подобный сравнительный анализ при обработке шлифованием эльборовым кругом, можно отметить, что при шлифовании термобарьерного слоя кругом с зернистостью Nz12 контактная температура Т(У) незначительно повышается, а остаточные напряжения G(У) понижаются в пределах 0,67÷0,62 МПа. При обработке кругом с зернистостью Nz16 контактная температура Т(У) незначительно повышается, а остаточные напряжения G(У) понижаются в пределах 0,65÷0,6 МПа, и при шлифовании эльборовым кругом с зернистостью Nz25 — Т(У) повышается и остаточные напряжения G(У) понижаются в пределах 0,63÷0,57 МПа.

Повышение температуры при шлифовании стабилизированного оксида циркония можно объяснить снижением теплопроводности напыленного слоя, а одновременно с этим уменьшение остаточных напряжений вытекает из уменьшения коэффициента теплового расширения.

Исследования шлифованной поверхности с помощью системы технического зрения [6] не выявили микротрещин на шлифованной поверхности, что свидетельствует о малых величинах единичных сил P<sub>γ</sub> и малых значениях временных напряжений, под действием которых, эти трещины могут образовываться

### Выводы.

1. При шлифовании эльборовым кругом термобарьерного покрытия формируемого из порошка двуоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия даже при некотором повышении контактной температуры шлифования по сравнению с чистым оксидом циркония, получены более низкие расчетные значения остаточных напряжений.

2. При шлифовании эльборовым кругом термобарьерного слоя из оксида циркония частично стабилизированного оксидом иттрия, наблюдаются более высокие температуры, но более низкие остаточные напряжения, по сравнению со шлифованием покрытия из чистого циркония.

3. Результаты исследования показывают, что применяемые в данной работе режимы шлифования термобарьерных покрытий алмазными и эльборовыми кругами не снижают качественных характеристик шлифованного слоя, то есть обеспечивают отсутствие трещин в напыленном слое и дают возможность избежать отслаивания керамического покрытия от основного металла детали.

**Список использованных источников:**

1. Вафин С.М., Хван В.И. Керамика на основе диоксида циркония. Достижения и перспективы / С.М.Вафин, В.И.Хван // Стоматолог-практик. – № 1. – 2011. – С. 20-27.
2. Аниканов В.С., Белова И.А., Макаров Н.А. / Керамика из диоксида циркония, стабилизированного добавками различной природы / В.С. Аниканов, И.А. Белова, Н.А. Макаров // Успехи в химии и химической технологии. Том XXIV. 2010. N 6 (111) С. 38-40.
3. Технология изготовления и физико-химические свойства керамики на основе нанокристаллического порошка композита диоксида циркония / А.В. Шевченко, В.В. Лашнева, Е.В. Дудник, А.К. Рубан, В.П. Редько, В.В. Цукренко, Д.Г. Вербило, Н.Н. Бричевский // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології: Зб. наук. пр. — К.: РВВ ІМФ, 2014. — Т. 12, № 2. — С. 333-345. — Бібліогр.: 15 назв. — рос.
4. Дубовий, О. М. Дослідження можливості підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з  $ZrO_2-7\%Y_2O_3$  передрекристалізаційною термічною обробкою / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, СІ. Шкурат, М.М. Бобров, Є.Ю. Неделько // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2017. – № 7 (1229). – С. 49-54. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07
5. Горелов В.А., Алексеев С.В. Особенности механической обработки деталей из керамических материалов М.: «Известия МГТУ МАМИ» № 2(14), 2012, т. 2. С. 64–67.
6. Дерев'янченко О.Г., Фроленкова О.В., Стасюк К.В., Мастега О., Дячук О.В. Система автоматизованого розпізнавання поверхневих дефектів деталей та інструментів. - Новые и нетрадиционные технологии в ресурс- и энергосбережении. Материалы международной научно-технической конференции (21-23 сентября 2016 г). - Одесса: ОНПУ, 2016. - С.41 -43.
7. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н.Маслов. – М. : Машиностроение, 1984. – 320 с.
8. Лебедев В.Г. Аналитическое исследование контактных температур и остаточных напряжений по глубине напыленного термобарьерного слоя  $ZrO_2$  при шлифовании абразивными, эльборовыми и алмазными кругами / Лебедев В.Г., Чумаченко Т.В., Фроленкова О.В. // Материалы 17-й междунар. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий» (29 мая-1 июня 2017 г.). – Одесса: ОНПУ, 2017. – С.105-108.

**Рецензенты**

**Ларшин В.П.**, профессор кафедры "Технологии машиностроения ОНПУ", д.т.н

**Лищенко Н.В.**, ст. преподаватель кафедры «Физики и материаловедения» ОНАПТ, к.т.н.

Стаття надійшла до редакції 23.03.2018