
**МЕТАЛЛЫ
И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ**

**ХАРАКТЕРИСТИКА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕРМОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТРОЙСТВАХ**© 2025 г. Y. Renuka^a, *, A. Anderson^a, **^a*School of Mechanical Engineering, Sathyabama Institute of Science and Technology, Rajiv Gandhi Salai, OMR Road, Jeppiaar Nagar, Solinganallur, Chennai, Tamil Nadu 600119 India*

*e-mail: renuteju.naidu@gmail.com

**e-mail: anderson.mech@sathyabama.ac.in

Поступила в редакцию 22.12.2023 г.

После доработки 13.04.2024 г.

Принята к публикации 30.05.2024 г.

В данной работе изучались многослойные термобарьерные покрытия, нанесенные методом атмосферного плазменного напыления. Проведено сравнение этих покрытий с однослойным покрытием $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (SZO). Рассмотрены два новых покрытия: двухслойное покрытие с промежуточным слоем из оксида циркония, стабилизированного иттрием (YSZ — от англ. yttria-stabilized zirconia), и многослойное функционально-градиентное покрытие с переменным соотношением YSZ/SZO. Все покрытия показали увеличение твердости по Виккерсу на 22% после термической обработки. У функционально-градиентных покрытий YSZ/SZO наблюдалось значительное снижение коэффициента трения (на 23%) по сравнению с двухслойным покрытием YSZ/SZO при комнатной температуре. Хотя после термической обработки глубина износа функционально-градиентных покрытий немного увеличилась, они, тем не менее, оказались наиболее перспективными кандидатами для нанесения на металлические детали оборудования, работающего при высоких температурах, благодаря высокой механической прочности и низкому коэффициенту трения.

Ключевые слова: атмосферное плазменное напыление, термобарьерное покрытие, функционально-градиентные покрытия, твердость по Виккерсу, глубина износа, коэффициент трения

DOI: 10.56304/S0040363625700870

Тепловые барьерные покрытия (ТВС — от англ. thermal barrier coatings) представляют собой слой определенных материалов, которые необходимо наносить на поверхности высокотемпературных объектов, чтобы защитить основной металл (подложку) от воздействия повышенной температуры, частых ее колебаний (термоциклы) и высоких градиентов температуры. Такие покрытия широко применяются в аэрокосмической технике, газотурбинных и морских двигателях, в различных устройствах для защиты их компонентов в условиях высоких температур. Нанесение покрытия приводит к снижению теплопроводности, а следовательно, к уменьшению термических напряжений, смягчению эффектов деградации основного металла.

Покрытия обычно состоят из трех слоев: верхнего керамического, термически выращенного оксида (TGO — от англ. thermally grown oxide) и связующего металлического покрытия, нанесенного на подложку из жаропрочного сплава [1].

Использование таких ТВС позволяет расширить диапазоны рабочих температур различных компонентов [2–6].

Важно отметить, что эффективность ТВС существенно зависит от материалов, из которых они изготовлены. Наиболее широко используемым в настоящее время является оксид циркония, стабилизированный иттрием. Эта керамика обладает исключительными теплоизоляционными свойствами, химической стабильностью и повышенной механической прочностью [7].

Свойства ТВС зависят от метода их создания. Верхнее керамическое покрытие наносится либо плазменным напылением, либо электронно-лучевым физическим осаждением из паровой фазы. Адгезия и жизненный цикл покрытий определяется связующим слоем, который создается между верхним покрытием и подложкой [8]. В качестве такого слоя часто применяются сплавы NiCoCrAlY, NiCrAlY, NiAl, а в качестве основного покрытия — керамики YSZ и оксид алюминия.

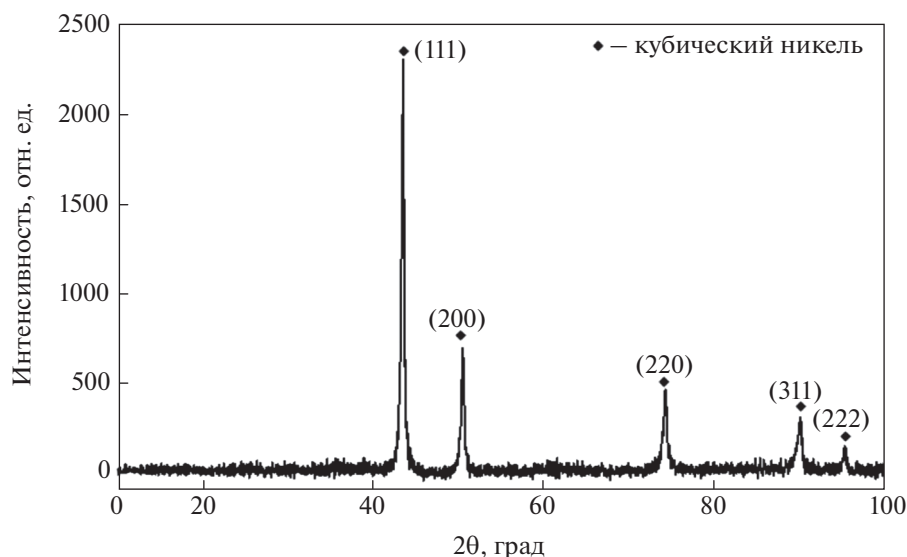


Рис. 1. Рентгенограмма сплава Hastelloy X.
 θ — угол скольжения (брегговский угол)

Эффективность и долговечность ТВС повышаются, если после нанесения их подвергают обработке различными методами [9].

В [10, 11] исследуется возможность применения в качестве альтернативы YSZ новой керамики $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (SZO), имеющей структуру оксида пирохлора. Такая керамика обладает высокими изолирующими свойствами благодаря своей структуре и многочисленным дефектам решетки. Эти дефекты интенсифицируют процесс рассеяния фононов, что приводит к снижению теплопроводности керамики. Следует отметить устойчивость SZO при температурах до 1900°C , низкий коэффициент теплового расширения ($10.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), отсутствие фазовых переходов и резких изменений объема, которые обычно приводят к возникновению напряжений.

В настоящем исследовании в качестве ТВС предлагаются две различные системы с использованием SZO и YSZ. Первая система состоит из нескольких слоев, в которой YSZ нанесен между SZO и связующим слоем NiCrAlY. Вторая система — функционально-градиентное покрытие, состоящее из нескольких слоев YSZ/SZO с переменным их соотношением. Механическая прочность этих покрытий оценивалась как до, так и после термических циклических испытаний с использованием микротвердомера Виккерса [12]. Одновременно проводились микроструктурный анализ и проверка химического состава покрытия с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM — scanned electron microscopy) в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDX — от англ. energy dispersive X-ray spectroscopy). Кроме того, кристаллические

фазы в этих покрытиях идентифицировались методом рентгеновской дифракции (XRD — X-ray diffraction). Для выявления потенциальных сбоев в устройствах с ТВС проводилось критическое исследование ухудшения состояния образцов с покрытиями с течением времени. Была проведена сравнительная оценка свойств двух предложенных систем.

Это комплексное исследование было направлено не только на углубление современных знаний в области применения термобарьерных покрытий, но и на создание новых современных покрытий, способных противостоять разрушительным механизмам в условиях высоких температур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Сплав Hastelloy X¹, использовавшийся в данном исследовании в качестве материала подложки, был закуплен на коммерческом рынке, и его состав был подтвержден с помощью XRD. В результате было выявлено наличие в сплаве кубического никеля, соответствующего данным JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards — Объединенный комитет по стандартам порошковой дифракции) для Hastelloy X (рис. 1).

Перед проведением испытаний пластину из сплава Hastelloy X толщиной 5 мм разрезали на квадратные (15×15 мм) и круглые (диаметр 20 мм) образцы. Поверхности, на которые впоследствии наносились покрытия, подвергали тщательной

¹ Hastelloy X — это сплав никеля, хрома, железа, молибдена с уникальной комбинацией стойкости к окислению, легкости обработки и термической стойкости.



Рис. 2. Образцы, подготовленные для нанесения покрытия

обработке. Сначала их полировали наждачными листами из карбида кремния с разной зернистостью, затем проводили ультразвуковую очистку ацетоном. После этого образцы высушивали пылесосом, маркировали, а их массу и толщину тщательно измеряли и регистрировали. И, наконец, полированную поверхность образца подвергали пескоструйной обработке для ее (поверхности) подготовки к последующему нанесению связующего покрытия. Подготовленные таким образом образцы показаны на рис. 2.

Все порошки, использовавшиеся для формирования ТБС [YSZ (7% иттрия), NiCrAlY и SZO)], были коммерчески доступны и имели чистоту 99.9%. Размеры частиц выбранного для проведения исследований порошка YSZ были менее 100 мкм, а частицы порошков NiCrAlY и SZO имели размеры до 40 и 90 мкм соответственно.

Изготовление ТБС осуществлялось методом плазменного напыления с использованием плазменного распылителя мощностью 40 кВт, оснащенного для создания высокоскоростной струи соплом GH, состоящего из суживающейся и расширяющейся частей. В качестве первичного газа в процессе нанесения покрытия применялся аргон со скоростью потока от 80 до 90 л/мин, а в качестве вторичного газа — водород со скоростью потока от 15 до 18 л/мин. Для обеспечения оптимального нанесения покрытия расстояние от сопла до подложки поддерживалось равным примерно 80 мм. Схемы исследованных покрытий показаны на рис. 3.

Для исследования морфологии поверхности разработанных покрытий использовали сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения (HRSEM) — Thermoscientific Apreo S, рассчитанный на напряжение 15 кВ и обеспечивающий увеличение 104×. Толщину покрытия определяли с помощью SEM в поперечном сечении образца. Сначала образцы подвергались термообработке при 1050°C в течение 5 ч в тигле из оксида алюминия, затем проводилось испытание на твердость микротвердомером Shimadzu HMV-G Series Vickers с нагрузкой 0.98 Н. Измерения каждого образца выполнялись по 5 раз.

Анализ состава всех образцов проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии в сочетании с SEM, а анализ кристаллической структуры — методом рентгеновской дифракции. Испытание на износ в соответствии со стандартом ASTM G 133 [13] проводилось с использованием линейного возвратно-поступательного трибометра Ducom Instruments.

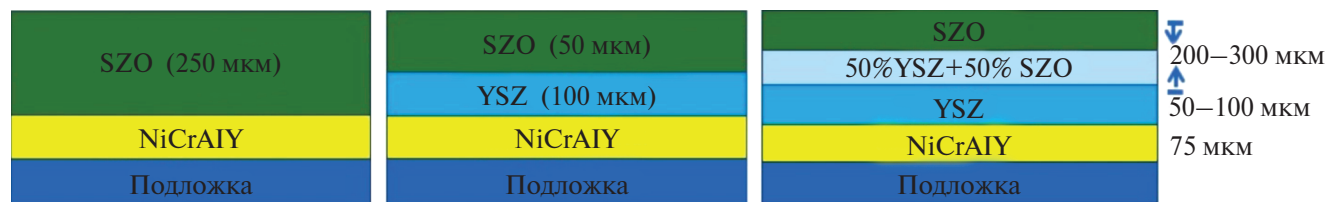


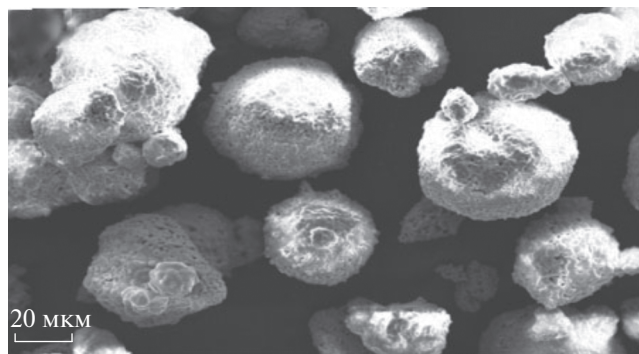
Рис. 3. Схемы исследованных покрытий.

a — однослойное SZO; *б* — двухслойное YSZ/SZO; *в* — функционально-градиентное YSZ/SZO

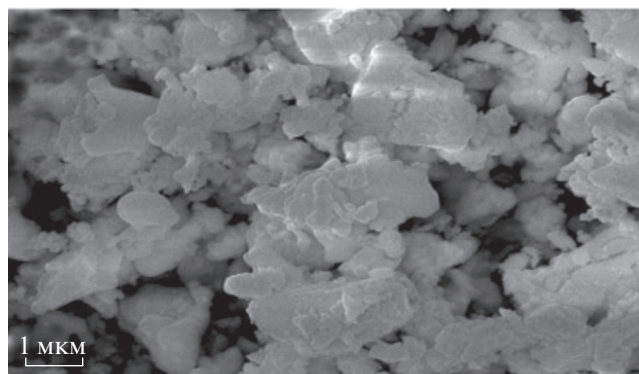
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ структуры исходных порошков

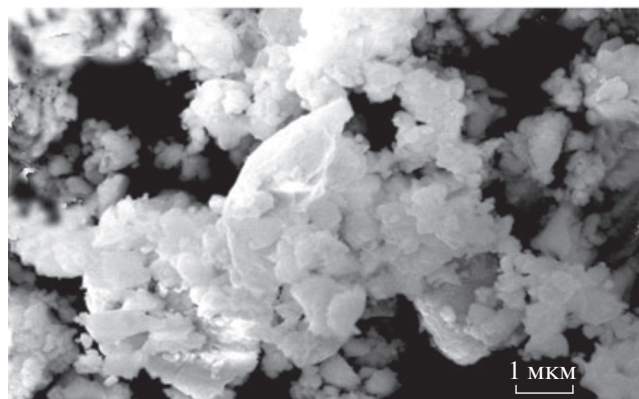
Размеры частиц порошка YSZ находятся в диапазоне от 20 до 60 мкм и имеют преимущественно сферическую форму (рис. 4, а). Частицы SZO также в основном сферические, и их размеры составляют 30–90 мкм (рис. 4, б). Следует отметить однородность (постоянство формы) частиц YSZ и SZO. На рис. 4, в показаны частицы смеси YSZ/ SZO.



а)



б)

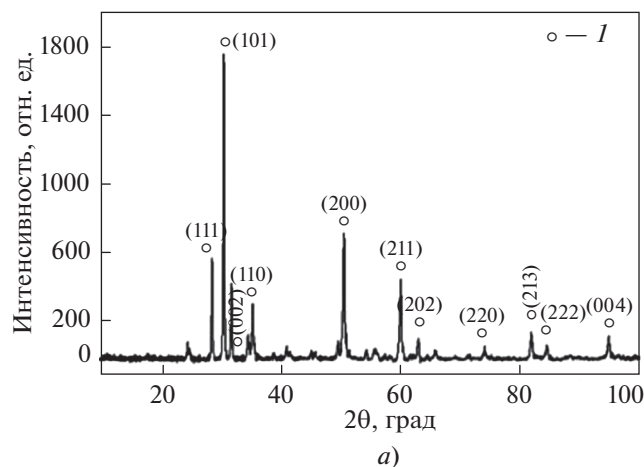


в)

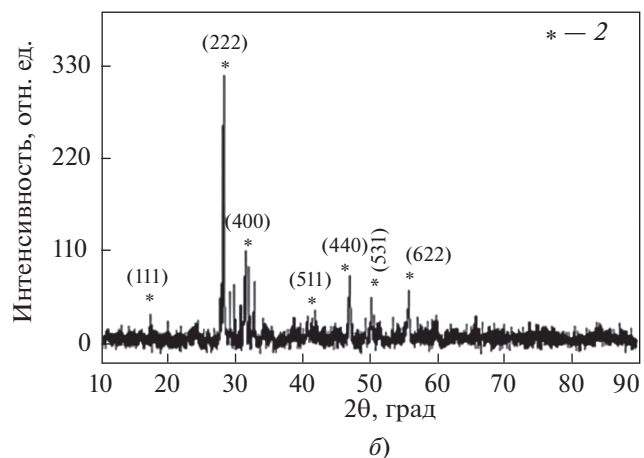
Рис. 4. Структуры исходных порошков, полученные методом SEM.
а – YSZ; б – SZO; в – смесь порошков YSZ/SZO

Напротив, частицы NiCrAlY имеют нерегулярную форму и их размеры варьируются от 20 до 40 мкм, что может существенно влиять на микроструктуру и механические свойства покрытия.

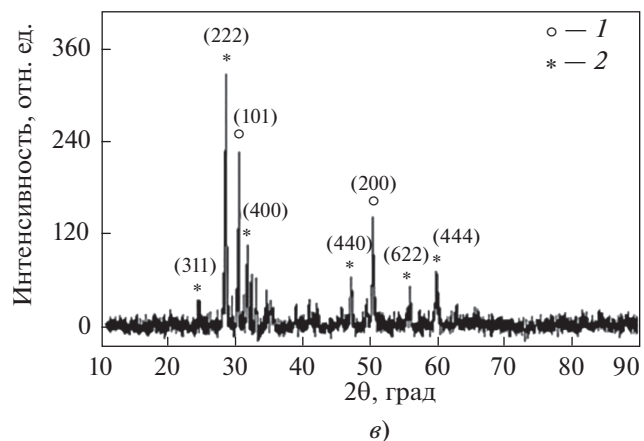
На рис. 5 показаны результаты, полученные с помощью рентгеновской дифракции, для исследуемых порошков: YSZ, SZO и смеси YSZ/ SZO.



а)



б)



в)

Рис. 5. Рентгенограммы исходных порошков.
1 – 7% $Y_2O_3 - ZrO_2$; 2 – кубический $Sm_2Zr_2O_7$.
Остальные обозначения см. рис. 4

Анализ XRD подтвердил состав порошка YSZ: 7% Y_2O_3 и 93% ZrO_2 (рис. 5, *а*). Присутствие кубического $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ было выявлено на рентгенограмме (рис. 5, *б*), что дало представление о составе этого порошка. И наконец, рис. 5, *в* показывает наличие фаз SZO и YSZ.

Полученные результаты использовались для анализа образцов с покрытием. Однородность частиц YSZ и SZO предполагает постоянную структуру покрытия, в то время как неровности частиц NiCrAlY могут повлиять на механические свойства покрытия. Подтвержденный с помощью XRD состав исходных порошков создает основу для комплексной оценки термобарьерных покрытий.

Образцы с покрытием

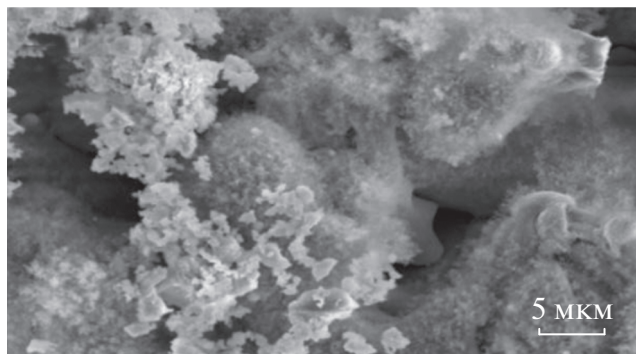
С помощью SEM-анализа были выявлены отличительные микроструктурные особенности образцов с покрытиями (рис. 6). Покрытие SZO имеет наиболее нерегулярную морфологию, обусловленную слиянием частиц во время осаждения, что приводит к микроструктуре с уплощенными частицами (см. рис. 6, *а*). На рис. 6, *б* сочетание сферических и субмикронных нерегулярных структур двухслойного покрытия YSZ/SZO указывает на сложные взаимодействия частиц в процессе нанесения покрытия. Функционально-градиентные покрытия (см. рис. 6, *в*) имеют однородную структуру с преимущественно сферическими частицами, характерными для порошка YSZ, что свидетельствует о контролируемом процессе осаждения.

Толщина однослойного покрытия из SZO составила 250 мкм (рис. 7, *а*), двухслойного (YSZ и SZO) – 150 мкм, причем на слой YSZ приходится 100 мкм (рис. 7, *б*). У функционально-градиентного покрытия наблюдается хорошая адгезия на границе подложка – покрытие, и эта граница практически неразличима (рис. 7, *в*), причем толщина покрытия меняется по поверхности подложки. Полученные результаты позволяют судить о возможных механических и тепловых последствиях использования покрытия каждой конфигурации.

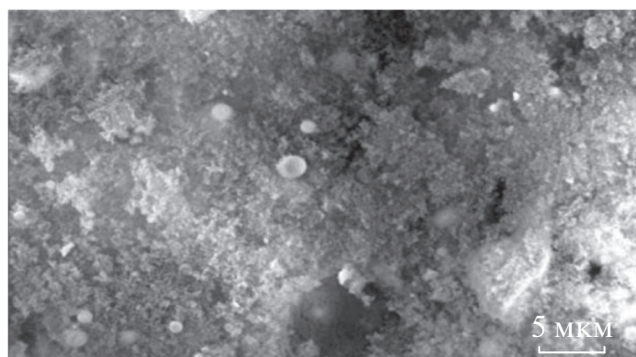
Фазовый состав покрытия

Рисунок 8 подтверждает наличие кристаллических структур во всех исследованных покрытиях. Высота пиков отображает количество определенных кристаллических плоскостей. Следует отметить, что в процессе осаждения не образуются и не обнаруживаются новые соединения.

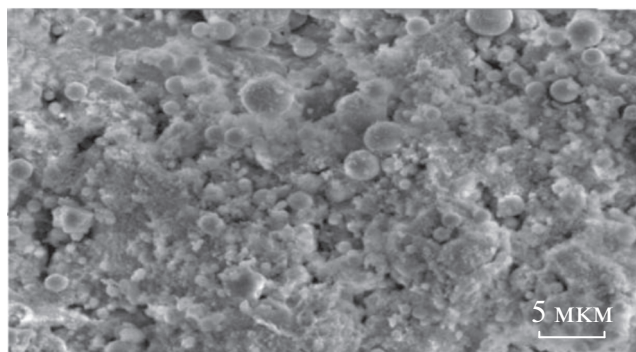
Для образца с покрытием из SZO (см. рис. 8, *а*) характерно присутствие кубического $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ и моноклинного ZrO_2 с едва заметными признаками Sm_2O_3 . Напротив, у образца с двухслойным



а)



б)



в)

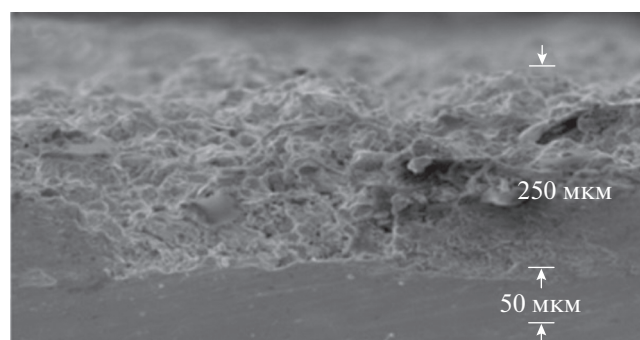
Рис. 6. Структуры покрытий, полученные методом SEM.

а – однослойное SZO; *б* – двухслойное YSZ/SZO; *в* – функционально-градиентное YSZ/SZO

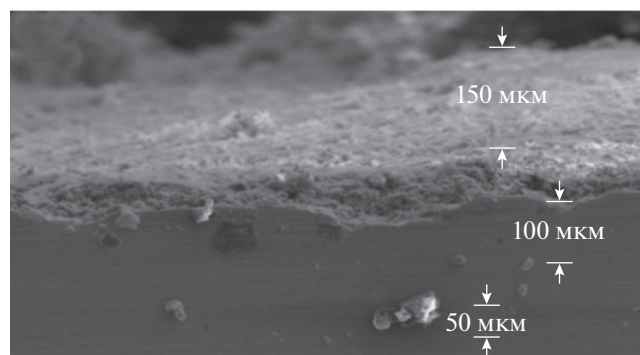
покрытием наблюдается наличие тетрагонального YSZ и очень небольшого количества $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (см. рис. 8, *б*). Рентгенограмма функционально-градиентного покрытия указывает на примерно такой же химический состав, как и у однослойного и двухслойного покрытий (см. рис. 8, *в*).

Твердость

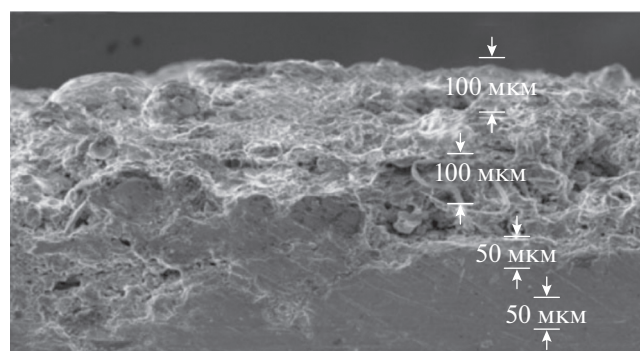
Измерение твердости с использованием нагрузки 0.98 Н, проводилось по 5 раз для каждого



а)



б)

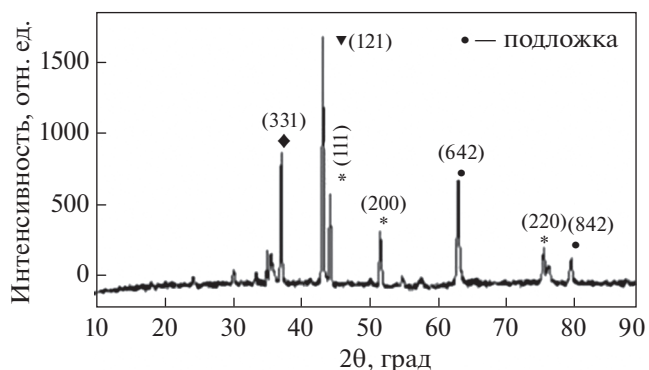


в)

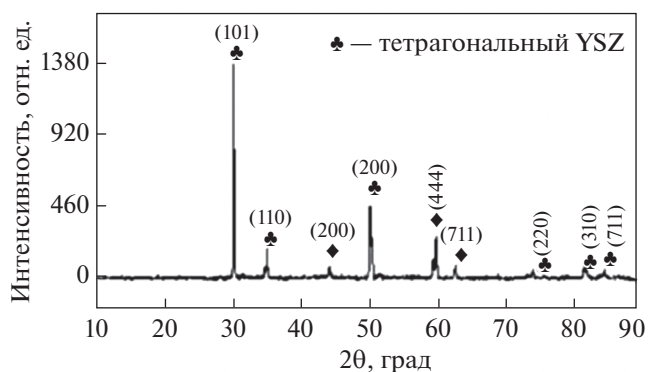
Рис. 7. Микрофотографии поперечных сечений покрытий, полученные с помощью SEM. Обозначения см. рис. 6

образца как с ТВС, так и без него. Кроме того, определялась твердость образцов, подвергшихся 5-часовой термообработке при 1050°C. Впечатляет то, что начальные значения твердости, варьирующиеся от 5.15 до 5.37 ГПа, свидетельствовали о замечательной согласованности между твердостью и микроструктурой исследованных покрытий.

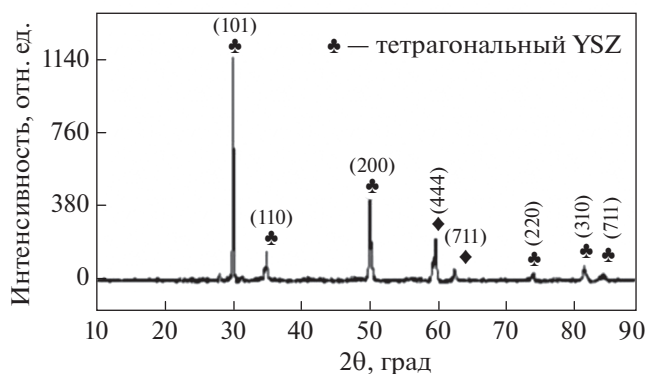
На твердость ТВС влияет не только наличие дефектов, но и такие факторы, как пористость, фазовый состав и остаточное напряжение процесса осаждения. Следует отметить, что при контролируемом нанесении покрытия методом плазменного напыления предпочтение отдается



а)



б)



в)

Рис. 8. Рентгенограммы покрытий. Обозначения см. рис. 6

тепловым, а не механическим характеристикам. Поэтому, хотя покрытие из SZO свободно от таких дефектов, как пузырьки или зазоры, оно обладает самой низкой твердостью — 5.158 ГПа.

После термообработки в течение 5 ч у всех трех покрытий наблюдалось значительное увеличение твердости — на 20–22%. Функционально-градиентное покрытие продемонстрировало существенное повышение твердости. Полученные значения твердости по Виккерсу и в гигапаскалях представлены в табл. 1. Согласно этим данным,

Таблица 1. Значения твердости покрытий до и после термообработки

Покрытие	До термообработки		После термообработки	
	HV0.1*	Эквивалентное в ГПа	HV0.1*	Эквивалентное в ГПа
Однослойное SZO	526 ± 6	5.158	634 ± 4	6.218
Двухслойное YSZ/SZO	535 ± 3	5.247	650 ± 5	6.375
Функционально-градиентное YSZ/SZO	548 ± 4	5.374	663 ± 4	6.502

* Твердость по Виккерсу.

термообработка заметно повышает механическую прочность покрытий.

Наблюдаемое увеличение твердости обусловлено многими факторами, такими как расширение зерен, наличие фазовых переходов и изменение микроструктуры, обусловленными процессом термообработки. Отсутствие существенных различий в значениях твердости после термообработки не только свидетельствует об однородности покрытий, но и объясняет их предсказуемое механическое поведение. Это увеличение твердости, явно выраженное в функционально-градиентном покрытии, указывает на повышенную эффективность и длительную выносливость таких покрытий при высоких температурах. Такие явления обогащают знания о теплозащитных покрытиях, открывают пути для дальнейшего их изучения и совершенствования.

Испытания на износ

Для образцов с покрытиями провели детальную оценку коэффициента трения C_f как при комнатной температуре, так и после термообработки при 400°C. Испытания на износ образцов квадратной формы с покрытиями выполняли по стандарту ASTM G133 с использованием в качестве индентора шарика из оксида алюминия (Al_2O_3) диаметром 6 мм. При комнатной температуре скорость скольжения индентора по поверхности образца составляла 3 см/с, длина скольжения — 5 мм, нагрузка — 5 Н. Затем эксперимент был повторен при 400°C, нагревание проводилось с помощью нагревательной спирали, встро-

енной в экспериментальное оборудование. Результаты испытаний представлены в табл. 2 и на рис. 9.

В испытаниях на износ при комнатной температуре функционально-градиентное покрытие YSZ/SZO показало самый низкий коэффициент трения, равный 0.539, в то время как у двухслойного покрытия был зафиксирован самый высокий $C_f = 0.661$. После термической обработки у функционально-градиентных покрытий было зафиксировано самое низкое значение коэффициента трения (0.510), а у двухслойного — самое высокое $C_f = 0.625$. Такое значение коэффициента трения у двухслойного покрытия можно объяснить повышенной шероховатостью поверхности, усилением межфазных взаимодействий и большим сопротивлением скольжению.

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии структуры покрытия на его трибологические характеристики, при этом функционально-градиентные покрытия YSZ/SZO превосходят двухслойные покрытия YSZ/SZO по снижению коэффициента трения. Градиентный состав покрытия способствует улучшению механических и трибологических характеристик, что приводит к уменьшению трения и износа.

Следует отметить, что термообработка не оказала заметного влияния на значения коэффициента трения, что подтверждает термическую стабильность покрытий. Неизменно низкие значения C_f для функционально-градиентных покрытий как до, так и после термообработки указывают на их потенциальную пригодность к использованию в

Таблица 2. Коэффициент трения образцов с покрытиями

Покрытие	Коэффициент трения	
	при комнатной температуре	после термообработки
Однослойное SZO	0.573	0.516
Двухслойное YSZ/SZO	0.661	0.625
Функционально-градиентное YSZ/SZO	0.539	0.510

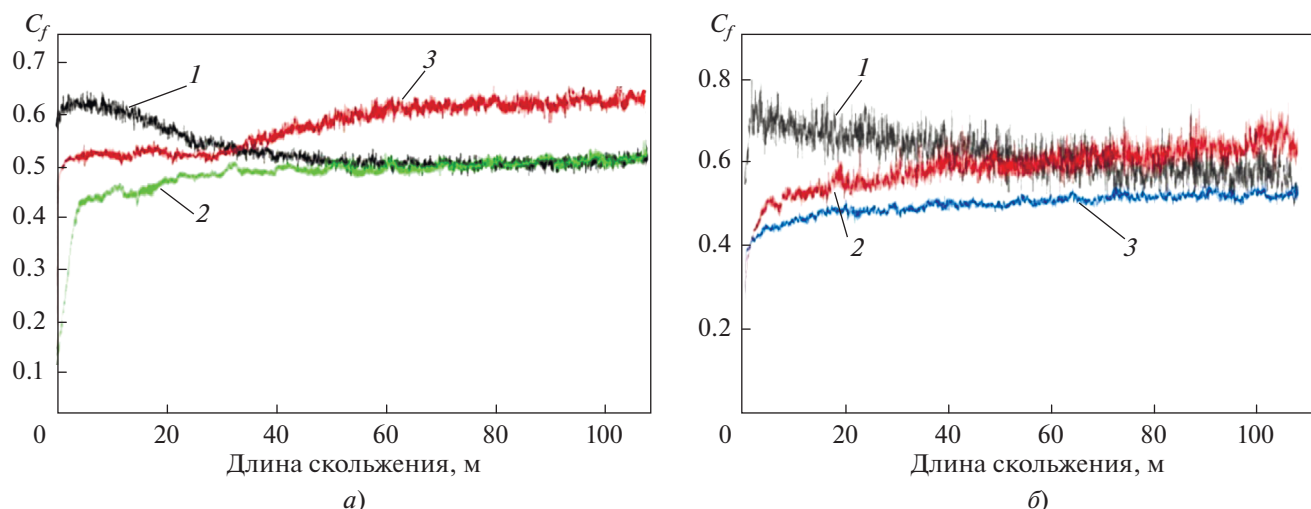


Рис. 9. Зависимости коэффициента трения образца с покрытием от длины скольжения до термообработки (а) и после термообработки при 400°C (б). Покрытие: 1 – однослойное SZO; 2 – двухслойное YSZ/SZO; 3 – функционально-градиентное YSZ/SZO

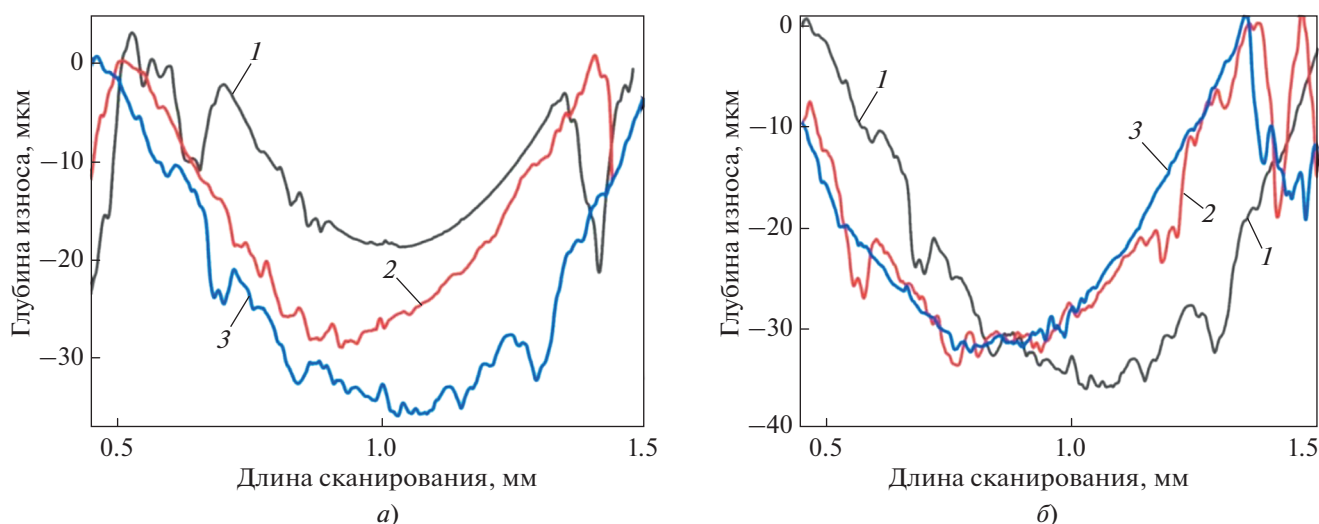


Рис. 10. Зависимости глубины износа образца с покрытием от длины сканирования до термообработки (а) и после термообработки при 400°C (б). Обозначения см. рис. 9

высокотемпературных устройствах, где требуются минимальное трение и износ оборудования.

При испытаниях на износ при комнатной температуре функционально-градиентные покрытия показали наибольшую глубину износа – 35.9 мкм, а однослойные покрытия SZO – наименьшую, равную 33.5 мкм. После термообработки функционально-градиентные покрытия сохранили самую большую глубину износа – 32.2 мкм, тогда как однослойное покрытие SZO вновь показало самую малую его глубину – 18.7 мкм. Эти результаты свидетельствуют о существенном влиянии

структуры покрытия на износостойкость. Таким образом, функционально-градиентные покрытия, имеющие уникальную микроструктуру, продемонстрировали большую глубину износа по сравнению с однослойными покрытиями SZO. Кроме того, влияние термической обработки на глубину износа было очевидным: у однослойного покрытия была зафиксирована повышенная износостойкость, тогда как у функционально-градиентных покрытий – увеличенная глубина износа.

На рис. 10 показаны зависимости глубины износа покрытий от длины сканирования. Все экс-

Таблица 3. Максимальная глубина износа покрытий

Покрытие	Максимальная глубина износа, мкм	
	до термообработки	после термообработки
Однослойное SZO	33.5	18.7
Двухслойное YSZ/SZO	35.8	28.9
Функционально-градиентное YSZ/SZO	35.9	32.2

периментальные данные, полученные в процессе испытаний на износ, представлены в табл. 3.

ВЫВОДЫ

1. Функционально-градиентные покрытия имели однородную структуру со сферическими частицами, в то время как у однослойных покрытий наблюдалась нерегулярная морфология, указывающая на слияние частиц во время осаждения.

2. Термическая обработка привела к увеличению твердости всех покрытий на 22%.

3. У функционально-градиентных покрытий YSZ/SZO коэффициент трения при комнатной температуре снизился на 23% (0.539) по сравнению с двухслойным покрытием YSZ/SZO (0.661). После термической обработки глубина износа функционально-градиентных покрытий уменьшилась на 10.7% (с 35.9 до 32.2 мкм), но все равно оказалась самой большой.

4. Функционально-градиентные покрытия YSZ/SZO остаются наиболее перспективными покрытиями благодаря их повышенной механической прочности после термообработки, низкому коэффициенту трения, снижающемуся при высоких температурах.

5. Необходимы дальнейшие исследования функционально-градиентных покрытий для оптимизации их износостойкости, возможно, путем корректировки параметров осаждения. Благодаря улучшенной после термообработки износостойкости однослойные покрытия $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ обладают значительным потенциалом использования в реальных условиях, однако для подтверждения этой возможности требуются дополнительные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Micro-structural** study and wear resistance of thermal barrier coating reinforced by alumina whisker / A.H. Pakseresht, M. Saremi, H. Omidvar, M. Alizadeh // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 366. P. 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.059>
2. **Miller R.A.** Current status of thermal barrier coatings – An overview // *Surf. Coat. Technol.* 1987. V. 30. Is. 1. P. 1–11. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(87\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0257-8972(87)90003-X)
3. **Meier S.M., Gupta D.K., Sheffler K.D.** Ceramic thermal barrier coatings for commercial gas turbine engines // *J. Mater.* 1991. V. 43. P. 50–51. <https://doi.org/10.1007/BF03220164>
4. **Padture N.P., Gell M., Jordan E.H.** Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications // *Science*. 2002. V. 296. Is. 5566. P. 280–284. <https://doi.org/10.1126/science.1068609>
5. **Xu H., Gong S., Deng L.** Preparation of thermal barrier coatings for gas turbine blades by EB-PVD // *Thin Solid Films*. 1998. V. 334. Is. 1–2. P. 98–102. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01124-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01124-9)
6. **Strangman T.E.** Thermal barrier coatings for turbine airfoils // *Thin Solid Films*. 1985. V. 127. Is. 1–2. P. 93–106. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(85\)90215-9](https://doi.org/10.1016/0040-6090(85)90215-9)
7. **Thermal barrier coating life prediction model development** / S.M. Meier, D.M. Nissley, K.D. Sheffler, T.A. Cruse // *J. Eng. Gas Turbines Power*. 1992. V. 114. Is. 2. P. 258–263. <https://doi.org/10.1115/1.2906581>
8. **Konuru S.L.K., Umasankar V., Sarma A.** Deposition of Tungsten-Tantalum composite coating on RAFM steel by sputtering deposition process // *Fusion Eng. Des.* 2020. V. 160. P. 111972. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111972>
9. **Effect of sintering on thermal conductivity and thermal barrier effects of thermal barrier coatings** / K. Wang, H. Peng, H. Guo, S. Gong // *Chin. J. Aeronaut.* 2012. V. 25. Is. 5. P. 811–816. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60449-4](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60449-4)
10. **Minervini L., Grimes R.W., Sickafus K.E.** Disorder in pyrochlore oxides // *J. Am. Ceram. Soc.* 2000. V. 83. Is. 8. P. 1873–1878. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01484.x>
11. **Thermal resistance determination of $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ composite type of TBC** / G. Moskal, A. Jasik, M. Mi-kuśkiewicz, S. Jucha // *Appl. Surf. Sci.* 2020. V. 515. P. 145998. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145998>
12. **Clarke D.R., Levi C.G.** Materials design for the next generation thermal barrier coatings // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2003. V. 33. P. 383–417. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.33.011403.113718>
13. **ASTM International. ASTM G133-05(2016).** Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. West Conshohocken, PA, 2021. <https://www.astm.org/g0133-05r16.html>

Characterization and Comparative Analysis of Multi-Layered Thermal Barrier Coatings for High-Temperature Applications

Y. Renuka^{a, *} and A. Anderson^{a, **}

^a School of Mechanical Engineering, Sathyabama Institute of Science and Technology, Rajiv Gandhi Salai, OMR Road, Jeppiaar Nagar, Solinganallur, Chennai, Tamil Nadu, 600119 India

*e-mail: renuteju.naidu@gmail.com

**e-mail: anderson.mech@sathyabama.ac.in

Abstract—This study investigated multi-layered thermal barrier coatings deposited by atmospheric plasma spraying for improved performance compared to a single-layered $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (SZO) coating. Two novel designs were evaluated: a yttria-stabilized zirconia (YSZ) intermediate layer and a functionally graded coating with variable YSZ/SZO ratios. Vickers microhardness revealed a uniform 22% increase for all coatings after heat treatment. Functionally graded YSZ/SZO coatings displayed a significant 23% reduction in coefficient of friction compared to the YSZ/SZO double layer coating at room temperature. While heat treatment slightly increased wear depth in functionally graded coatings, they emerged as the most promising candidate due to their improved mechanical strength and low coefficient of friction, suggesting their potential for enhanced durability and thermal barrier performance.

Keywords: atmospheric plasma spraying, thermal barrier coating, functionally graded coatings, Vickers hardness, wear depth, coefficient of friction