

УДК 621.793.7:621.762

СОВРЕМЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ
ПОКРЫТИЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
И ИНТЕНСИВНОГО ИЗНОСА

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, В. В. ОКОВИТЫЙ,
О. Г. ДЕВОЙНО, А. А. ЛИТВИНКО

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

На основе проведенного обзора современного применения и особенностей создания материалов для нанесения многослойных плазменных покрытий, работающих в условиях высоких температур и интенсивного износа, можно констатировать, что композиции из металлокерамики на основе сплавов никель (кобальт)-хром-алюминий-иттрий (иттербий, церий) и оксидов (диоксид циркония, оксид алюминия, оксид алюминия-оксид титана, оксид церия, оксид иттербия и их композиции) являются основой для целого спектра таких покрытий. Металлические сплавы на основе материала MCrAlY очень часто применяются как функциональное внешнее покрытие или связующее покрытие при процессе плазменного напыления и весьма полезны при защите поверхностей от разрушения при высокотемпературном воздействии на компонентах эксплуатируемых деталей. Новая область использования данных покрытий может быть получена путем добавления частиц новых материалов к базовой металлической матрице MCrAlY для создания композиционных покрытий. Газотермические покрытия MCrAlY с усиленными функциональными свойствами из-за добавления армирующих элементов, таких как иттрий-стабилизированный диоксид циркония (YSZ) ($\text{ZrO}_2\text{-}8\text{Y}_2\text{O}_3$), CeO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, Al_2O_3 , диоксид циркония (CSZ) ($\text{ZrO}_2\text{-}25\text{CeO}_2\text{-}2,5\text{Y}_2\text{O}_3$) [1], характеризуются повышенными механическими свойствами, коррозионной и термической стойкостью. Однако недостаточная прочностная связь между оксидами и металлической матрицей, формирование трещин, сколы, пористость являются характерными недостатками у газотермически напыленных покрытий.

Для уменьшения этих дефектов и улучшения прочностных характеристик покрытия применяются различные варианты последующей высокоэнергетической обработки с помощью лазера или компрессионной плазмы. Добавление оксидной керамики со стабилизацией редкоземельными элементами (РЗЭ) в покрытиях MCrAlY может значительно улучшить как износостойкость, так и коррозионную стойкость покрытий. РЗЭ, будучи поверхностно-активными элементами, снижают поверхностное натяжение и межфазную энергию между ядром кристалла и расплавом в процессе затвердевания, что приводит к улучшению смачивающих свойств и уменьшению краевого угла между расплавом и подложкой [2–4]. В последние годы редкоземельные элементы успешно применялись для изменения поверхностных свойств покрытий, наносимых методом термического напыления. Добавление РЗЭ в покрытия

приводит к измельчению зерен и очистке границ зерен, что увеличивает микротвердость и износостойкость покрытий, снижается коэффициент трения. Низкокачественное топливо обычно содержит примеси, такие как Na и V, которые могут образовывать коррозионные соли Na_2SO_4 и V_2O_5 на покрытии лопаток турбины [1]. Эти расплавленные коррозионные соли могут проникать на всю толщину YSZ через граничные пятна и другие дефекты покрытия YSZ, такие как микротрещины и открытые поры [2]. Проникшие соли могут затем реагировать с оксидом иттрия (стабилизирующий компонент YSZ), и истощение стабилизатора и фазовое превращение тетрагонального диоксида циркония в моноклинный диоксид циркония может происходить очень быстро и эффективно во время охлаждения. Это фазовое превращение также сопровождается быстрым объемным расширением на 3 %...5 %, что приводит к растрескиванию и отслаиванию ТЗП. Добавление Al_2O_3 в покрытие YSZ в ТЗП, напыленных атмосферной плазмой, может значительно снизить диффузию расплавленных солей в слой YSZ и приводит к более высокому сопротивлению ТЗП против горячей коррозии. Можно сказать, что слоистый композит ТЗП, содержащий оксид алюминия, может значительно предотвратить горячую коррозию [1]. Интересно отметить, что Al_2O_3 не может растворяться в ZrO_2 . Оксид алюминия (как жесткая матрица) может окружать только частицы ZrO_2 в системе ТЗП. Это явление может создавать локальные сжимающие напряжения, которые могут препятствовать фазовому превращению тетрагонального диоксида циркония в моноклинную фазу [3]. Тетрагональная фаза ZrO_2 недостаточно стабильна для длительного применения в условиях окружающей среды [4], однако добавление частиц оксида алюминия (Al_2O_3) к ZrO_2 является одним из эффективных методов ингибирования низкотемпературной деградации. Более того, добавление частиц Al_2O_3 минимального размера может привести к дополнительному повышению прочности. Традиционные плазменные напыления ТВС первоначально выявили серьезную проблему низкой прочности во время термоциклирования [1], и это было связано с плохой прочностью связи между покрытием и подложкой, низкой устойчивостью к эрозии/коррозии и отслаиванием покрытий. Эти проблемы могут быть устранены при использовании многослойных покрытий. Концепция многослойных покрытий была впервые предложена для получения материала, способного выдерживать серьезные термомеханические нагрузки, которые часто случаются в конструкциях и термоядерных реакторах в системах космических аппаратов, керамических двигателях, газовых турбинах и дизельных двигателях. Уникальность этой идеи состоит в том, чтобы приготовить новый композит с использованием термостойкой керамики на высокотемпературной стороне, чтобы обеспечить адекватную термостойкость, и твердых металлов с высокой теплопроводностью на низкотемпературной стороне для обеспечения необходимой механической прочности, с постепенным изменением состава от керамики к металлам. Кроме того, оптимальное градиентное распределение состава, микроструктуры и пористости разработано для эффективного снятия термического напряжения и значительного улучшения механических и термических свойств. Для напыления многослойных покрытий применяются различные газотермические методы распыления высокоскоростного кислородного

топлива (HVOF), детонационное напыление, газопламенное, плазменное напыление в вакууме, плазменное напыление на воздухе.

Плазменное напыление на воздухе – наиболее гибкий, эффективный и недорогой метод изготовления многослойных покрытий. Были проведены многочисленные исследования механических и термических свойств многослойных покрытий, полученных плазменным напылением [1]. Однако необходимы обширные исследования во многих аспектах, таких как проектирование, подготовка, оценка и последующая обработка покрытий после напыления. До сих пор в нескольких работах исследовалось улучшение прочности связи покрытий и, как мы знаем, недостаточно высокая для некоторых способов применения прочность связи между покрытием и подложкой многослойных покрытий, сформированных плазменным напылением, всегда является проблемой, когда эти покрытия работают в неблагоприятных условиях. Предлагаемое направление проводимых нами исследований будет касаться технологий создания композиционных порошковых материалов для формирования многослойных плазменных покрытий, работающих в условиях высоких температур при тяжелых и повышенных нагрузках. Для принятия решений, направленных на непосредственное внедрение таких многослойных покрытий, необходимо проанализировать возможности синтеза новых порошковых композиций из оксидной керамики с добавлением металлических сплавов и разработать принципы и критерии, дающие возможность прогнозировать свойства разрабатываемых покрытий, полученных с применением плазменного напыления и последующей высокоэнергетической обработки, на основе исследований оптимизировать технологические параметры плазменного напыления порошковых композитов и последующей модификации. В рамках осуществляемой работы будут изучены спектры влияния формируемых структур из разработанных порошковых композиций плазменных покрытий на физико-механические и эксплуатационные свойства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пантелеенко, Ф. И.** Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый. – Мн. : БНТУ, 2019. – 231 с.
2. Получение композиционного керамического материала для газотермического напыления / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 181–188.
3. **Пантелеенко, Ф. И.** Исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий диоксид циркония – нихром / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, Е. Ф. Пантелеенко // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 3. – С. 100–105.
4. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический NiCr и твердый ZrO₂ слои) / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 21–28.