

УДК 621.793.7

Ф. И. Пантелеенко, чл.-корр. НАН Б, д-р т. н., проф., **В. А. Оковитый**, к.т.н.,
О. Г. Девойно, д-р т. н., проф., **А. С. Володько**, **В. А. Сидоров**, к.т.н., доцент,
В. В. Оковитый, ²**В. М. Асташинский**, чл.-корр. НАН Б, д-р физ.-мат. н., проф.

Белорусский Национальный Технический Университет, г. Минск, Беларусь

Тел./ Факс+375 17 293-95-99, E-mail: niil_svarka@bntu.by

²*Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Тел./Факс +375 17 284-24-91, ² E-mail: ast@hmti.ac.by*

СОВРЕМЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ МЕТАЛЛ-ХРОМ-АЛЮМИНИЙ-ИТТРИЙ (М-КРОЛЕЙ)

В статье анализируются современное применение и особенности металлокерамических плазменных покрытий. Можно констатировать, что эти композиции (оксидно-металлический компонент) используются в качестве диэлектрических, теплозащитных и износостойких покрытий. В данной работе особое внимание уделено влиянию формируемой структуры на физико-механические и эксплуатационные свойства сплавов MCrAlYTa, армированных тугоплавкими оксидами (например, Al₂O₃ Al₂O₃-TiO₂) и керамики Al₂O₃-TiO₂ с добавлением твердых металлов. Чистые MCrAlYTa не подходят для трибологических применений, поскольку их низкая твердость может привести к очень высокому износу в условиях скользящего контакта, особенно в фазах обкатки при низких температурах. Поэтому изготовление композиционных покрытий на основе сплавов MCrAlYTa, армированных тугоплавкими оксидами, представляется необходимым решением для того, чтобы связать стойкость металла к окислению с твердостью и химической стабильностью керамической фазы.

Ключевые слова: металлокерамические плазменные покрытия, диэлектрические, теплозащитные и износостойкие покрытия, формованные структуры, физико-механические и эксплуатационные свойства, М-кролики, диоксид титана-оксид алюминия.

F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devoino, A. S. Volodko, V. A. Sidorov, V. V. Okovity, V. M. Astashinsky

MODERN APPLICATION OF CERMET COATINGS BASED ON METAL-CHROMIUM-ALUMINUM-YTTRIUM SYSTEMS

The article analyzes the current application and features of metal-ceramic plasma coatings. It can be stated that these compositions (oxide-metal component) are used as dielectric, heat-shielding and wear-resistant coatings. In this work, special attention is paid to the influence of the formed structure on the physicomachanical and operational properties of MCrAlYTa alloys reinforced with refractory oxides (for example, Al₂O₃ Al₂O₃-TiO₂) and ceramics Al₂O₃-TiO₂ with the addition of hard metals. Pure MCrAlYTa are not suitable for tribological applications because their low hardness can lead to very high wear under sliding contact conditions, especially during the running-in phases at low temperatures. Therefore, the fabrication of composite coatings based on MCrAlYTa alloys reinforced with refractory oxides seems to be a necessary solution in order to relate the resistance of the metal to oxidation with the hardness and chemical stability of the ceramic phase.

Keywords: metal-ceramic plasma coatings, dielectric, heat-shielding and wear-resistant coatings, formed structures, physical and mechanical and operational properties, M-rabbits, titanium dioxide-aluminum oxide.

1. Введение

В настоящее время в технике существует множество узлов трения, в которых применяются износостойкие материалы - шаровые и цилиндрические подшипники, вкладыши, подпятники, скользящие токосъемники, направляющие, шарнирные устройства, торцевые и боковые уплотнения и др. Они работают в разнообразных условиях - при граничном трении, со смазкой, при повышенных температурах, высоких скоростях, больших нагрузках, трении без смазки, в вакууме. Процессы коррозии, неблагоприят-

© Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Володько А.С., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М.; 2021

ного воздействия изнашивания, являются главными причинами поломки металлоконструкций и деталей машин. По этим причинам в промышленности выходит из строя около 80-90% деталей. Все эти обстоятельства не дают возможности получить универсальный материал для работы в узлах трения. Возникает необходимость получения различных материалов для заданных условий работы в условиях трения. Из обзора литературы [1-16] известно, что самыми перспективными для получения износостойких плазменных покрытий, повышающих долговечность и надежность механизмов и машин, являются те материалы, которые могут выдерживать максимальные нагрузки без пластической деформации в парах трения в большом интервале эксплуатационных температур и обладающих наивысшей стойкостью при абразивном износе, способностью работать в агрессивных средах и вакууме. Наиболее перспективными для работы в таких условиях являются композиции, которые состоят из металлокерамической матрицы и равномерно распределенной в ней оксидной составляющей. Работоспособность таких композиций обеспечивается высокими прочностными свойствами металлокерамической матрицы. Постоянное воспроизведение данного слоя при работе в условиях трения, равномерно распределенной по всему объему материала, создает нужный эффект самосмазываемости. Все вышеперечисленные особенности позволяют предполагать, что плазменные износостойкие порошковые покрытия найдут широкое применение в техники, как защитные, так и антифрикционные [6-12]. Атмосферное плазменное напыление (APS) - это действующий коммерчески доступный метод, который использовался многими исследователями для создания экономически выгодных покрытий. Использование высоких температур и плотности энергии позволяют наносить покрытия из тугоплавких материалов, таких как Al_2O_3 , ZrO_2 и другие, которые трудно расплавить с помощью традиционных процессов термического напыления [7]. По сравнению с керамическим плазменным покрытием, керметные, состоящие из керамических частиц, связанных с металлическими частицами, проявляют превосходную стойкость к тепловому удару в высокотемпературной атмосфере. Кроме того, они обладают совместными преимуществами керамики и металла, такими как твердость и ударная вязкость. Кроме того, эффективность покрытий может быть существенно повышена путем дальнейшего модифицирования их структуры при последующей высокоэнергетической обработке [8]. Высокоэнергетические источники подводимой энергии обладают рядом особенностей и преимуществ при последующей обработке плазменных покрытий: локальностью и высокой концентрацией получаемой энергии, которая позволяет обрабатывать нужный участок нанесенного покрытия без нарушения его структуры и свойств из-за нагрева всего объема; способностью управления параметрами обработки, обеспечивающими регулирование последующей структуры обрабатываемого слоя, его шероховатости, износостойкости, твердости, необходимых геометрических размеров; значительному уплотнению слоя покрытия после обработки и соответственно к снижению шероховатости и устранению пористости. Тем не менее необходимо учитывать способность высокоэнергетической обработки к изменению и перераспределению напряжений в покрытии, тем более существенному, чем меньше толщина покрытия и выше мощность излучения, именно поэтому требуется очень серьезная оптимизация режимов обработки [9].

2. Современное применение металлокерамических покрытий

В работе [17] процесс осаждения с помощью плазменной наплавки (РТА) был применен для разработки высокотемпературных защитных металлокерамических покрытий, в NiCrAlY был добавлен наполнитель из стабилизированного иттрием диоксида циркония (YSZ) с двумя различными размерами частиц для создания керметных по-

крытий. Сплавы MCrAlY часто используются в качестве функционального верхнего покрытия или связующего покрытия при плазменном напылении и особенно полезны для защиты поверхностей от разрушения при высокой температуре в компонентах газовых турбин и авиационных двигателей. Новая область применения таких покрытий может быть разработана путем добавления частиц наполнителя к базовой матрице MCrAlY для формирования композиционных покрытий. Термически напыленные композитные покрытия MCrAlY с улучшенными функциональными свойствами благодаря добавлению армирующих элементов, таких как CeO_2 [6], Al_2O_3 ; $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ [18], диоксид циркония (CSZ) ($\text{ZrO}_2\text{-25CeO}_2\text{-2,5Y}_2\text{O}_3$) [19] или иттрий-стабилизированный диоксид циркония (YSZ) ($\text{ZrO}_2\text{-8Y}_2\text{O}_3$) [20–23] имеют повышенные механические свойства, коррозионную и термическую стойкость. Тем не менее, недостаточная связь между оксидами металла (наполнителей) и матрицей, образование трещин, пористость являются типичными недостатками термически напыленных покрытий. Для того, чтобы избежать или уменьшить эти дефекты и улучшить прочность сцепления покрытия с подложкой применяется последующая высокоэнергетическая обработка с помощью лазера или импульсной плазмы. В данной работе проведены исследования покрытий из композиционных материалов на основе металлической матрицы (ММС), нанесенных методом плазменной наплавки (ПТА). Композиты были приготовлены с использованием механических смесей YSZ ($\text{ZrO}_2\text{-13 мас.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3$), имеющих различные объемные концентрации, которые были включены в матрицу NiCrAlY . Морфологию и структуру композиционных покрытий анализировали с помощью микроскопических наблюдений, энергодисперсионной спектроскопии и дифракции рентгеновских лучей. Механические свойства ММС-покрытий оценивали по микротвердости.

Порошок NiCrAlY , используемый в качестве матрицы, представляет собой распыленный газом порошок (рис. 1а) с гранулометрическим составом 45–125 мкм. В качестве наполнителя использовали порошки $\text{ZrO}_2\text{-13 мас.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ с гранулометрическим составом 22–45 мкм (рис. 1б) и 5–22 мкм. Три порошка ММС были приготовлены механическим смешением двух порошков с использованием: (i) YSZ с распределением грануляции 22–45 мкм (10 и 30 об.% в смеси); и (ii) YSZ с распределением грануляции 5–22 мкм (20 об.% в смеси) с порошком металлической матрицы NiCrAlY . $\text{ZrO}_2\text{-13 мас.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ добавляли к матрице NiCrAlY для снижения теплопроводности покрытий. Изменение концентрации Y_2O_3 приводит к стабилизации диоксида циркония в разных кристаллических фазах. Смеси механически смешивали и сушили при температуре около 120 °С в течение 24 часов. Поверхность подложки была подготовлена путем пескоструйной обработки и предварительного нагрева в печи на открытом воздухе при температуре около 365 °С для покрытий NiCrAlY-10YSZ и 400 °С для покрытий NiCrAlY + 20YSZ и NiCrAl-30YSZ . Во время процесса наплавки измерения температуры расплавленной ванны проводились с использованием инфракрасной камеры FLIR S C600, имеющей чувствительность в диапазоне длин волн $\lambda = 8\text{-}14$ мкм. Измерения температуры проводились на расстоянии около 1,5 м от поверхности образца. Композитные покрытия были нанесены в один слой. Переменные параметры наплавки ПТА, такие как ток передаваемой дуги, напряжение и реальная скорость наплавки, а также постоянный параметр во время наплавки, такой как расход порошка, были сведены в один параметр, который представляет основные факторы осаждения Q ($\text{Дж}\cdot\text{с}/\text{мм}\cdot\text{г}$) рассчитывается по формуле (1):

$$Q = \frac{P}{v \times d} \quad (1)$$

где: P представляет собой электрическую мощность передаваемой дуги (Вт); v представляет скорость сканирования поверхности (мм/с), а d представляет скорость по-

дачи порошка (г/с). Рабочие параметры, используемые для обработки ММС-покрытий, приведены в таблице 1. После обработки ПТА образцы охлаждали до комнатной температуры. Затем их подвергали термообработке при 500 °С в течение 2 ч и оставляли в печи для охлаждения до комнатной температуры, чтобы уменьшить остаточные напряжения, возникающие в процессе наплавки.

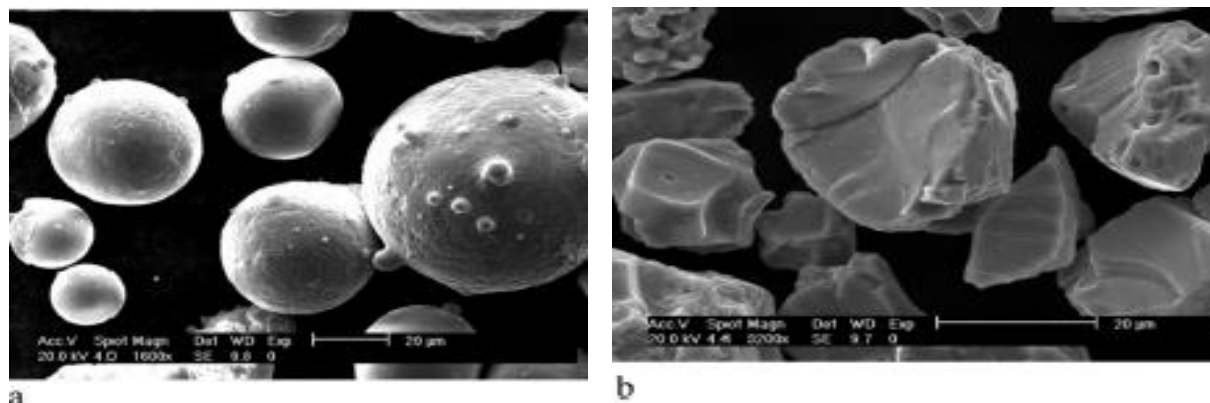


Рисунок 1. СЭМ-микрофотографии порошков, используемых для нанесения покрытий: а) порошок металлической матрицы NiCrAlY; б) порошок наполнителя YSZ с гранулометрическим составом 22–45 мкм.

Используя более низкую скорость колебаний, коррелированную с большим током передаваемой дуги, было реализовано металлургическое соединение между покрытием NiCrAlY + 10YSZ и подложкой. В случае NiCrAlY-30YSZ, поддерживая постоянную скорость колебаний, но уменьшая ток передаваемой дуги, на границе с подложкой образовывались оксидные островки. Затем для осаждения NiCrAlY-20YSZ скорость осцилляции и ток перенесенной дуги были увеличены для обеспечения высокой дисперсии энергии на локальном контакте между плазмой перенесенной дуги и подложкой. Покрытие NiCrAlY-10YSZ имеет небольшую пористость вблизи частиц YSZ. Напротив, NiCrAlY-30YSZ и NiCrAlY-20YSZ не имели такой пористости. Наличие пористости в композитном покрытии (включая матрицу) с меньшим количеством частиц наполнителя YSZ (NiCrAlY-10YSZ) по сравнению с NiCrAlY-30YSZ может быть обусловлено более низким значением Q-параметра. Это было получено при использовании более высокого тока перенесенной дуги в процессе разработки, коррелирующего с более низкой температурой подложки. Температура предварительного нагрева подложки (365 °С) также поддерживалась постоянной во время обработки. Наконец, было невозможно получить плотное покрытие. Более низкие размеры частиц, осажденных при постоянном давлении газа-носителя, улучшили микроструктуру покрытия, содержащего 20% YSZ. Дисперсия частиц YSZ небольшого размера была лучше в таком покрытии.

Композитные покрытия с более крупными размерами частиц обладали высокой средней микротвердостью по Виккерсу (HV_{0,3}): 493 ± 38 для NiCrAlY - 10YSZ и 482 ± 40 для NiCrAlY - 30YSZ из-за присутствия включений оксида. Покрытие NiCrAlY - 20YSZ показало среднюю микротвердость по Виккерсу (HV_{0,3}) 309±33, что объясняется уменьшенным числом включений оксида.

Наконец, было обнаружено, что керметные покрытия, включающие мелкие частицы YSZ-наполнителя в концентрации 20 об.% в матрице NiCrAlY, были оптимальным выбором среди всех протестированных в представленных условиях. Это связано с лучшим включением мелких частиц YSZ в металлическую матрицу, хорошей метал-

лургической связью с подложкой и отсутствием микроструктурных дефектов в морфологии покрытия, но с меньшей микротвердостью.

Таблица 1. – Рабочие параметры, используемые для обработки ММС-покрытий.

Покрытие	Q, Дж·с/ мм·г	Ток дуги, А	Расход плазмо- образу- ющего аргона, л/мин	Расход защит- ных га- зов (Ar-H ₂), л/мин	Скорость осцилляции, мм/с	Расход тр. га- за, л/мин	Дист. обра- ботки, мм
NiCrAlY + 10YSZ	4884	162	1,4	1,4	3,9	3,5	8
NiCrAlY + 30YSZ	4972	153	1,4	1,4	3,9	3,5	8
NiCrAlY + 20YSZ	4001	160	1,4	1,4	4,9	3,5	8

В источнике [24] слои NiCrAlY, содержащие различные количества Al₂O₃ (0, 3, 6, 12, 18 мас.%), Наносились на подложки из нержавеющей стали с помощью «гибридного» плазменного распыления, при котором порошок NiCrAlY подавался в сухом виде, в то время как мелкодисперсный порошок Al₂O₃ диспергировался в этанол и вводился через систему подачи суспензии. Покрытия для долговременной защиты механических компонентов от сильного износа скольжения при высоких температурах широко используются в различных областях промышленности, в первую очередь в области производства энергии. Примеры включают защиту валов и подшипников в авиационных и наземных газовых турбинах [25], деталей паровых турбин [26] и компонентов для атомных электростанций [27] и т. д.

В настоящее время, однако, эта проблема полностью не решена. Твердые металлы, особенно те, которые основаны на карбидах хрома (например, Cr₃C₂-NiCr), довольно широко используются [28], но они имеют ряд недостатков. Из-за их высокой твердости обработка этих покрытий трудоемка и дорога. Они также обладают неоптимальной стойкостью к окислению при самых высоких температурах из-за внутренней диффузии кислорода через частицы карбида хрома и, следовательно, из-за их избирательной деградации [29].

Лучших характеристик в окислительных средах можно достичь с помощью систем на основе сплавов типа MCrAlY (где M=Co и/или Ni), которые соответственно используются для предотвращения окисления и горячей коррозии лопаток турбин, лопаток и других компонентов в горячем состоянии. секции газовых турбин, до 1100 °C [30]. В большинстве цитируемых ссылок такие композиты MCrAlY + Al₂O₃ наносились с помощью процессов термического напыления: их основные преимущества включают высокую производительность и гибкое соединение большого разнообразия материалов для покрытий и подложек [31]. Они действительно являются стандартным выбором для нанесения стойких к окислению сплавов MCrAlY в вышеупомянутых применениях газовых турбин [31-33]. Все образцы были изготовлены методом плазменного напыления в атмосфере с использованием горелки TriplexPro-200 (Oerlikon-Metco, Wohlen, Швейцария) с тремя катодами и одним анодным соплом. Исходным сырьем для матрицы MCrAlY стандартный порошок Ni - 22 мас.% Cr - 10 мас.% Al - 1 мас.% Y (AMDRY 9624, Oerlikon-Metco) с номинальным гранулометрическим составом - 45+15 мкм, который традиционно подавали на факел в сухом виде. Исходным материалом для арми-

рования Al_2O_3 был субмикрометрический порошок (АКР-30, Sumitomo Chemicals Co., Япония) со средним размером частиц 300 нм. Поскольку эти мелкие частицы обладали бы недостаточной текучестью и недостаточным импульсом для обычной подачи в поток плазмы с использованием газового носителя, порошок диспергировали в среде этанола с помощью 2 мас.% Диспергатора (Veicostat C213) и подавали с использованием системы доставки жидкости на основе резервуаров под давлением жидкости. Суспензия подается через инжектор с сапфировым соплом диаметром 150 мкм. Инжектор наклонен под углом 70° относительно оси горелки и расположен таким образом, что поток суспензии направлен к центру выхода из сопла анода. Параметры напыления NiCrAlY и Al_2O_3 приведены в таблице 2. Чтобы изменить относительные количества матрицы NiCrAlY и армирования Al_2O_3 в покрытиях, скорость подачи порошка NiCrAlY и содержание твердого вещества в суспензии варьировали, как указано в таблице 3. Цель настоящего испытания состояла в том, чтобы проанализировать характеристики различных покрытий в зависимости от температуры и содержания Al_2O_3 , а также дать общее представление об их основных характеристиках износа скольжения. Для этой цели в качестве контртела были выбраны спеченные шарики Al_2O_3 диаметром 6 мм. Из-за своей химической инертности они не вызывают нежелательных трибохимических взаимодействий с материалом покрытия. Износостойкость образцов была исследована в условиях сухого скольжения путем однонаправленного испытания вращающимся шариком на диске в соответствии со стандартом ASTM G99 (рисунок 2). Испытания проводились на расстоянии скольжения 2000 м при относительной скорости скольжения 0,10 м/с и радиусе следа износа 5 мм при нормальной нагрузке 5 Н. Испытания проводились при комнатной температуре (Е 25 °С) при 400 °С и 700 °С, чтобы охватить широкий диапазон температур, относящихся к широкому спектру потенциальных применений. Образцы после нанесения и образцы, испытанные при 400 °С, имеют аналогичные значения твердости которые имеют тенденцию к увеличению с количеством Al_2O_3 до 12 мас.% (рисунок 3) м при относительной скорости скольжения 0,10 м/с и радиусе следа износа 5 мм при нормальной нагрузке 5 Н. Это увеличение, однако, не очень заметно, вероятно, из-за несколько ограниченной когезии частиц Al_2O_3 с окружающими ламелями NiCrAlY. Дальнейшее увеличение содержания Al_2O_3 до 18 мас.% Даже приводит к тому, что твердость снова снижается, вероятно, из-за избыточного количества дефектов, возникающих при кластеризации частиц Al_2O_3 . Напротив, после выдерживания при 700 °С значения твердости значительно возрастают и становятся практически нечувствительными к содержанию Al_2O_3 .

Твердость повышается из-за повышения как внутривламеллярной прочности (благодаря выделению твердой [31], мелкодисперсной β -фазы), так и межламеллярной когезии (благодаря заживлению межламеллярных границ). Эти эффекты определенно преобладают над эффектом усиления Al_2O_3 , так как сцепление последнего с окружающей матрицей остается ограниченным: диффузия не повлияет на Al_2O_3 при 700 °С. Скорость износа чистого покрытия NiCrAlY при комнатной температуре составляет $5 \times 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$. Для сравнения, эта величина более чем на порядок выше, чем у термически напыленных покрытий Fe-Cr-B и Ni-Cr-B-Si, протестированных в идентичных условиях авторами в предыдущих работах ($1-5 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$) [33].

Добавление до 6 мас.% Al_2O_3 приводит к снижению скорости износа при комнатной температуре до $1-5 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$ (рис. 2). При увеличении содержания Al_2O_3 скорости износа стремятся к $6 \times 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$, то есть ниже, чем у ранее упомянутых неармированных покрытий Fe-Cr-B и Ni-Cr-B-Si. В то время как потеря износа неармированного покрытия NiCrAlY непрерывно уменьшается от комнатной температуры до

400 °С и 700 °С, потери износа композиционных покрытий с 6-18 мас.% Al_2O_3 ниже при комнатной температуре, чем при 400 °С.

Таблица 2. – Параметры процесса плазменного напыления.

NiCrAlY	Диаметр анодного сопла, мм	6,5
	Ток, А	450
	Напряжение, В	103,4
	Тип первичного газа / скорость потока (расход), SL/мин	Ar/70
	Энтальпия плазмы, МДж/кг	12,8
	Дистанция напыления, мм	100
	Температура предварительного нагрева подложки, °С	200-250
	Количество циклов предварительного нагрева	20
Al_2O_3	Диаметр порошкового инжектора, мм	1,8
	Скорость подачи порошка, г/мин	10-35
	Расход подаваемого газа, SL/мин	7
	Давление нагнетания, МПа	0,6
	Содержание твердого вещества в суспензии, мас.%	10-40
	Скорость подачи суспензии, мл/мин	30

Таблица 3. – Скорости подачи порошка и концентрации суспензии для экспериментов.

Соотношение, вес.%	Фактическое содержание Al_2O_3 , вес%	Содержание твердых веществ в суспензии, вес%	Скорость подачи сухого порошка, г/мин
NiCrAlY	0	-	20
NiCrAlY + 3% Al_2O_3	3,4	10	35
NiCrAlY + 6% Al_2O_3	5,9	10	20
NiCrAlY + 12% Al_2O_3	12,1	20	10
NiCrAlY + 18% Al_2O_3	17,6	40	10

«Гибридный» процесс атмосферного плазменного напыления с системой двойного впрыска использовался для получения композиционных покрытий NiCrAlY- Al_2O_3 для защиты от скольжения механических компонентов в широком диапазоне температур. Обычная подача порошка NiCrAlY в сухом виде сочеталась с инъекцией суспензия мелких частиц Al_2O_3 , диспергированных в этаноле. Покрытия состоят из крупных NiCrAlY-ламелей с вкраплениями мелких округлых частиц Al_2O_3 . Распыление на воздухе вызвало некоторое окисление вдоль границ фазы NiCrAlY, уменьшив межламеллярную когезионную прочность и лишив металлический сплав его наиболее реакционноспособных элементов (а именно Al и Y).

Добавление частиц Al_2O_3 вызывает лишь незначительные изменения твердости. Добавление Al_2O_3 приводит к монотонному снижению скорости скольжения при комнатной температуре от 5×10^{-4} мм³/(Нм) для чистого NiCrAlY до 6×10^{-6} мм³/(Нм) для NiCrAlY – 18 мас.% Al_2O_3 . Чистый NiCrAlY страдает от сильного адгезионного расслаивающего износа, чему способствует наличие хрупких межламеллярных оксидных включений.

В композиционных покрытиях механизм износа изменяется на трибоокисление с незначительным появлением адгезии. Вытягивание некоторых частиц Al_2O_3 является ключевым фактором для инициирования формирования трибо-слоя, который постепенно развивается за счет размазывания и уплотнения окисленных фрагментов NiCrAlY.

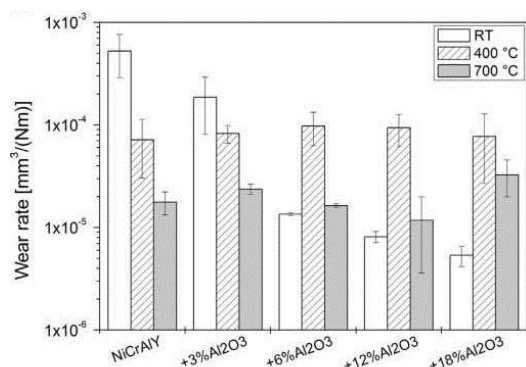


Рисунок 2. Скорости износа при скольжении шарик-на-диске при комнатной температуре, 400 °С и 700 °С

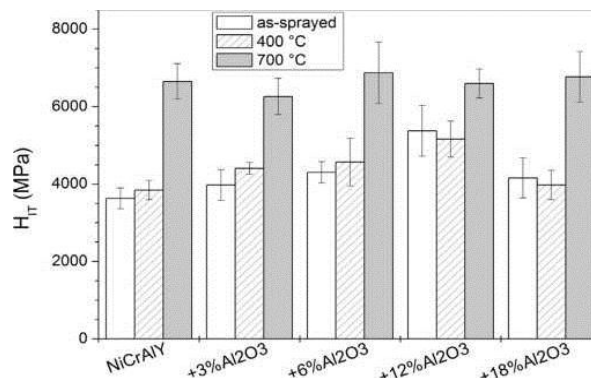


Рисунок 3. Значения твердости на всех образцах до и после изотермического выдерживания при 400 °С и 700 °С во время испытаний на износ

Износ протекает из-за локального растрескивания и откола трибослоя, что иногда приводит к адгезионному износу. При 400 °С и 700 °С скорость износа всех образцов выравнивается до $8 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$ и $2 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Нм})$ соответственно. Доминирующим механизмом износа является трибоокисление, но в этом случае оно происходит посредством прямого окисления поверхности покрытия с образованием плотного «глазурного» слоя. Поэтому эффект от добавления Al_2O_3 становится неактуальным. Дополнительные изменения в матрице NiCrAlY, происходящие при 700 °С (частичное заживление межламеллярных границ и внутриламеллярное переосаждение субмикрометрической фазы $\beta\text{-NiAl}$), дополнительно способствуют уменьшению возникновения адгезионного износа в открытых областях. Это вместе с лучшей стабильностью слоя «глазури» при этой температуре объясняет, почему скорость износа при 700 °С ниже, чем при 400 °С.

3. Заключение

На основе анализа современного применения и особенностей металлокерамических плазменных покрытий можно констатировать, что данные композиции (оксид-металлическая составляющая) используются в качестве диэлектрических, теплозащитных и износостойких покрытий. Предлагаемое нами направление исследований касается технологии нанесения износостойких покрытий для восстановления и упрочнения деталей трибосопряжений, эксплуатирующихся при неблагоприятных условиях граничной смазки или в отсутствие смазочного материала, при повышенных нагрузках и колебаниях температур (моторостроение, металлургическое оборудование, авиационная и космическая техника). Согласно результатам проведенных исследований для таких условий эффективны упрочненные газотермические покрытия, содержащие твердые тугоплавкие соединения. Указанные покрытия наносят плазменным напылением с последующей высокоэнергетической обработкой импульсами компрессионной плазмы (лазерного излучения). К факторам износостойкости в данном случае относится состав композиционных частиц исходных порошков, обеспечивающий эффективную структуру покрытий. Кроме того, высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий обеспечивает их упрочнение за счет уплотнения и формирования измельченной (нанокристаллической), неравновесной (аморфной) структуры при сверхбыстром охлаждении оплавленных слоев толщиной 30 – 100 мкм. Вместе с тем для окончательных выводов и решений, направленных на успешное внедрение упомянутых покрытий, целесообразно изучить перспективы синтеза новых композиционных порошков из керамики с применением добавок тугоплавких металлов и разработать критерии прогнозирова-

ния свойств покрытий из них, полученных плазменным напылением; исследовать и оптимизировать технологических параметров плазменного напыления композиционных порошков.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with the inclusion of solid lubricants. *Welding production* – M., 2002. – №6. – С.41-43.
2. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant / V. Okovity // *J. Welding International*. – 2003. – vol.16, № 11. – P. 918-920.
3. Okovity, V. A. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.I. Shevtsov, V.V. Okovity, V.M. Astashinsky, E.A. Kostyukevich // *High Temperature Material Processes* 18(1–2), 45–62 (2014).
4. Okovity, V. A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.F. Panteleenko // *Processing of metals*. – Novosibirsk, 2015. – №2 (67). – P.46-54.
5. Okovity, V. A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / V.A. Okovity, F.I. Panteleenko, V.M. Astashinsky, V.V. Bruised // “*Science and Technology*”, BNTU – Minsk, 2018. – Issue 3. – P. 183-189.
6. Vityaz, P. A. Theory and practice of applying protective coatings / P.A. Vityaz, V.S. Ivashko, A.F. Ilyuschenko, A.I. Shevtsov, E.D. Manoilo. – Minsk, 1998.
7. Vityaz, P. A. Basics of application of wear-resistant, corrosion-resistant and heat-protective coatings / P.A. Vityaz, A.F. Ilyuschenko, A. I. Shevtsov. – Minsk: Belarusian. Science, 2006. – P.205-243, 280-300, 314-351.
8. Ilyuschenko, A. F. Plasma coatings based on ceramic materials / A.F. Ilyuschenko, V.A. Okovity, A.I. Shevtsov. – Minsk: Besprint, 2006. – 316 p.
9. Асташинский, В. М. Получение и исследование элементов экранной противометеорной защиты на основе многослойных композиционных плазменных покрытий NiAl-Al₂O₃ / В.М. Асташинский [и др.] // *Труды международного форума «15-Минский международный форум по тепломассообмену» Минск, 23-26 мая 2016.* – С. 40-44.
10. Ильющенко, А. Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек. – Минск: Беспринт, 2002. – 480 с.
11. Ильющенко, А. Ф. Теплозащитные покрытия на основе ZrO₂ / А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Ремика, 1998. – 128 с.
12. Достанко, А. П. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А.П. Достанко, А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас. – Минск: Армита - Менеджмент, 1999. – 436 с.
13. Современные технологии нанесения теплозащитных керамических покрытий / В.С. Ивашко и др. // *Известия Белорусской инженерной академии.* – 1997. – № 2(4). – С. 28-32.
14. Оковитый, В. В. Технологические особенности формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония / Оковитый В.В. [и др.] // *Наука и техника.* – БНТУ, 2016. – Вып.3. – С.193-199.
15. Оковитый, В. А Формирование и исследование многослойных композиционных оксидных плазменных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты для международного научно-технического журнала / Оковитый В.А. и др.// *Наука и техника.* – БНТУ, 2016. – С.270-276.

16. Пантелеенко, Ф. И. Разработка технологии нанесения плазменных композиционных покрытий на основе диоксида циркония для систем космических аппаратов / Пантелеенко Ф.И. [и др.] // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2015. – Вып.3. – С.5-9.
17. Микроструктурные исследования стабилизированных NiCrAlY - Y₂O₃ керметных покрытий ZrO₂, нанесенных плазменной дугой (ПТА), Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6057–6074.
18. X. Sun, S. Chen, Y.Wang, Z. Pan, L. Wang, Mechanical properties and thermal shock resistance of HVOF sprayed NiCrAlY coatings without and with nano ceria, J. Therm. Spray Technol. 21 (5) (2012) 818–824.
19. L. Zhou, W. Zhou, F. Luo, J. Su, D. Zhu, Y. Dong, Microwave dielectric properties of low power plasma sprayed NiCrAlY/Al₂O₃ composite coatings, Surf. Coat. Technol. 210 (2012) 122–126.
20. J.H. Lee, D.B. Lee, Hot corrosion of NiCrAlY/(ZrO₂–CeO₂–Y₂O₃) composite coatings in NaCl–Na₂SO₄ molten salt, Mater. Sci. Forum 658 (2010) 228–231.
21. C. Zhu, Y.G. Wang, L.N. An, A. Javed, P. Xiao, G.Y. Liang, Microstructure and oxidation behavior of conventional and pseudo graded NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings produced by supersonic air plasma spraying process, Surf. Coat. Technol. 2015.04.014.
22. D.B. Lee, C. Lee, High-temperature oxidation of NiCrAlY / (ZrO₂–Y₂O₃ and ZrO₂–CeO₂–Y₂O₃) composite coatings, Surf. Coat. Technol. 193 (2005) 239–242.
23. A.M. Khoddami, A. Sabour, S.M.M. Hadavi, Microstructure formation in thermal-sprayed duplex and functionally graded NiCrAlY/Yttria-stabilized zirconia coatings, Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6019–6024.
24. Трибология композиционных покрытий NiCrAlY -Al₂O₃ полученных методом плазменного напыления с гибридной подачей сухого порошка -суспензии., Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6030–6044.
25. J.R. Davis, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2004.
26. B.S. Mann, B. Prakash, High temperature friction and wear characteristics of various coating materials for steam valve spindle application, Wear 240 (2000) 223-230.
27. R.N. Johnson, Wear resistant coatings for reactor components in liquid sodium environments, J. Vac. Sci. Technol. 11 (1974) 759.
28. C.C. Li, Characterization of thermally sprayed coatings for high temperature wear protection applications, Thin Solid Films 73 (1980) 59-77.
29. W.J. Bryan, D. Jones, Wear resistant coating for components of fuel assemblies and control assemblies, and method of enhancing wear resistance of fuel assembly and control assembly components using wear-resistant coating, US Patent No. 5,434,896, 1995.
30. S. Matthews, B. James, M. Hyland, High temperature erosion-oxidation of Cr₃C₂-NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions, Corros. Sci. 70 (2013) 203-211.
31. S. Bose, High Temperature Coatings, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2007.
32. J.A. Cabral-Miramontes, C. Gaona-Tiburcio, F. Almeraya-Calderon, F.H. Estupinan- Lopez, G.K. Pedraza-Basulto, CA Poblano-Salas, Parameter studies on high-velocity oxy-fuel spraying of CoNiCrAlY coatings used in the aeronautical industry, Int. J. Corros. 2014 1-8.
33. S. Li, C. Langlade, S. Fayeulle, D. Trkheux, Influence of the microstructure of plasma deposited MCrAlY their tribological behaviour, Surf. Coat. Technol. 101

Поступила в редколлегию 30.03.2021 г.