

УДК 621.793.7

М. В. КИНДРАЧУК¹, Е. К. ФЕНЬ², В. Н. ПАЩЕНКО²

¹Национальный авиационный университет, Украина

²Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина

ЖАРОИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ (СОДЕРЖАЩИЕ В СВОЁМ СОСТАВЕ СКАНДИЙ) НАПЫЛЕННЫЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Исследованы твёрдость, прочность сцепления с основой, интенсивность изнашивания при трении скольжении без смазки и при износе на фреттинг покрытий, содержащих в своём составе скандий. Разработано несколько видов порошковых материалов для плазменного напыления, а также несколько видов состава шихты порошковых проволок для электродугового нанесения покрытий, с разным химическим составом и процентным соотношением между собой в них компонентов.

Ключевые слова: скандий, прочность сцепления, твёрдость, износ при фреттинге, газотермические покрытия.

Введение. Развитие современной техники характеризуется постоянным ростом разного рода нагрузок на поверхностные слои деталей и конструкций изделий. Особенно это касается деталей авиационной техники, которые работают в экстремально-тяжёлых условиях. На них действуют высокие и низкие температуры, агрессивная внешняя среда, знакопеременные нагрузки и т.п. Решение проблемы повышения стойкости поверхностей деталей и конструкций к различным внешним и внутренним факторам, лежит в плоскости нанесения специальных покрытий из материалов, которые имеют повышенные физико-механические свойства.

Хорошие результаты для получения физико-механических свойств покрытий, показывают такие методы газотермического напыления, как: сверхзвуковой плазменный и электродуговой.

Состояние проблемы. Для восстановления деталей различных транспортных средств (например, автомобилей заправщиков, автокаров, валиков транспортёров и т.п.), наиболее перспективным, по отношению к другим методам нанесения покрытий, является электродуговой метод, который использует порошковые проволоки. Данный метод особенно эффективен в случае необходимости получения покрытий (на восстанавливаемых деталях) с высокой прочностью сцепления с основой и высокой износостойкостью, а также контролируемой пористостью. Обычно порошковая проволока содержит в своём составе шихту из порошков железа, хрома, марганца и других металлов и сплавов. Для напыления таких порошковых проволок используют в основном опытно-промышленный электродуговой металлатор марки УСЭМ-2М (разработки ИГ НАНУ). В основу металлатора положена схема обдува стабилизированной электрической дугой, горящей между двумя порошковыми проволоками, горячими продуктами горения смеси метана (или пропан-бутана) и воздуха, истекающими из соплового аппарата со сверхзвуковой скоростью.

Для деталей авиационной техники, работающей при значительных перепадах температур и знакопеременных нагрузок, агрессивных сред и т.п., наиболее перспективным методом нанесения покрытий из порошковых материалов, является сверхзвуковой плазменный метод. Для нанесения таких покрытий исполь-

зують в основному плазменну установку марки «Київ-7» (розробки ВІСП) с модернізованим плазмотроном марки ПУН-1. В якості жароізносоустойких порошкових матеріалів в основному використовують сплави на основі Ni-Cr-(Co)-Al-Y с добавками других металлів и тугоплавких соединений.

Цель работы и постановка задачи. Перед промисленностью Украины стоит задача о полной или частичной замене РЗМ (итрий, лантан и т.п.) таким материалом, которым обладает Украина, и использование которого обеспечит получение высоких физико-механические свойства износо- и жаростойких покрытий. Таким материалом может стать скандий, так как Украина имеет значительные промышленные запасы руд с высоким процентным содержанием в них скандия [1–4].

Разработка порошковых проволок с высокими физико-механическими свойствами покрытий, для их нанесения на детали и конструкции различных механизмов и изделий электродуговым методом напыления, особенно нужна тогда, когда покрытия работают в условиях повышенного износа. Данные покрытия должны обладать высокой твёрдостью и прочностью сцепления с основой и контролируемой пористостью, а главное высокой износостойкостью.

Разработка и создание порошковых материалов для напыления их плазменным методом, которые обеспечат для деталей авиационной техники высокие износостойкие свойства покрытий, при высоких прочностях сцепления их с основой, высокой твёрдостью при обычных и высоких температурах (1100–1200 °С), нужна для работы изделий и конструкций в различных экстремальных условия.

Для каждого вида условий работы этих деталей и конструкций требуется точный подбор своего, определённого химического состав исходного материала для покрытия и метода его нанесения, при восстановлении изношенных и упрочнения новых деталей.

Результаты исследований. Порошковые проволоки, что представлены в данной работе, имеют оболочку из ленты стали 08кп (ГОСТ 503-81), с содержанием шихты из порошков следующего состава: ферромарганец марки ФМп-88 (ГОСТ 4755–91); феррохром марок ФХ850 или ФХ900 (ГОСТ 4757–92); ниаль марки ПН70Ю30 (ТУ 14–3282–81); гексаборид лантана марки ГЛ (разработки ГИРМ, ТУ 6-09-03-8-75); нитрид бора (ГОСТ 9910–88); хром марок ПХ–1 или ПХ–2 (ТУ 14–274–75); порошок железа марки ПЖР–2 (ГОСТ 9849–86) и соответственно порошок алюминий-скандий марки АС95–5 (95%Al–5%Sc, разработки ИПМ НАНУ). Данные материалы варьировалась в разных соотношениях между собой, как в составе шихты, так и в процентном соотношении между собой. Единственно, что в каждой шихте для порошковой проволоки присутствовал порошок марки АС95–5. Размер частиц порошков составляет 40–100 мкм. Коэффициент заполнения шихтою проволоки, диаметром 2,0–2,4 мм, составляет 30–32.

Как указано выше, порошковые проволоки напыляли электродуговым металллизатором марки УСЭМ-2М на подложки из стали 40 и стали 55. Структурные исследования, проведенные на микроскопе МИМ-9, показали в покрытии образование пересыщенных твёрдых растворов переменной концентрации. Структура покрытий имеет слоистый характер, характерный для покрытий из порошковых материалов. Структура покрытий представляет собой условно двухфазную структуру – светлые поля внедрения в серой фазе (с включениями тугоплавких соединений), которые состоят из мельчайших, чередующихся меж-

ду собой слоёв. Граница раздела покрытие-основа не содержит раковин, отслоения или трещин для данных покрытий. В системе «покрытие-основа» действуют напряжения сжатия, которые затрудняют образованию трещин в покрытии, увеличивают сопротивление усталостному разрушению деталей и повышают износостойкость материала покрытия.

Прочность сцепления покрытий с основой определялась методом «конусного штифта» [5] на разрывной машине марки МР-5, с диаметром иглы в основании 2,0–2,5 мм. Так прочность сцепления покрытий со сталью 40 составляет 65–73 МПа, а со сталью 55 – соответственно 72–80 МПа.

Твёрдость по Бринелю измерялась на установке марки ТШ-2М (ГОСТ 912-84 и ГОСТ 18835-73) и составляет 440–550 НВ, при шероховатости поверхности шлифа $R_a = 0,32-0,16$ (ГОСТ 2789-73), для покрытий из порошковых проволок.

Испытание на износ при трении скольжении без смазки на воздухе исследуемых покрытий проводили на машинах трения СМЦ-2 и УМТ-1 (ГОСТ 26614-85), при нагрузке $P = 1$ МПа, скорости скольжения $V = 0,5$ м/с и температуре $T = 20$ °С. Износ поверхности покрытий составляет 5,5–13 мм³/1000 м·см² в зависимости от состава шихты и её % соотношения между собой. Контртело из латунных сплавов марок ЛКС80-3-3 и ЛАЖ60-1-1Л (ГОСТ 17711-72).

Испытания на износ при фреттинге проводили на машине трения марки МФК-1 (разработки КИИГА) [6], с использованием пары образцов с одноименным покрытием. Режимы испытаний: удельная нагрузка $P = 20$ МПа, амплитуда виброперемещений $A = 0,1$ мм, частота колебаний $f = 30$ Гц, температура испытаний $T = 20$ °С, база испытаний $N = 5 \cdot 10^5$ циклов. Износ на фреттинг находится в пределах 4,5–11 мкм.

Триботехнические испытания показали, что для исследуемых покрытий характерно механохимическое изнашивание, сопровождающееся образованием на поверхностях сопряжённой пары плёнок обогащенных кислородом, которые являются своеобразной смазкой.

Порошковые материалы, что представлены в данной работе, для жароизносостойких покрытий, имеют состав из сплавов на Ni–Cr–(Co)–Al–Y–Sc основе с добавками гексаборида лантана марки ГЛ, нитрида алюминия (ТУ 6-09-110-75) и двойного карбида титана и хрома марки ПСТУХ (ТУ 88 УССР 147-040-87). Порошок скандия присутствует в виде лигатуры сплава АС95-5. Размер частиц порошков сплавов составляет 63–80 мкм, а тугоплавких компонентов – 20–63 мкм. Химический состав предложенных жароизносостойких покрытий подбирался с таким учётом, что основу сплава Ni–Cr–(Al–Sc) составляет никель, а содержание хрома и алюминия, и их % соотношение между собой выбирали с таким учётом, чтобы обеспечить формирование структур содержащих не менее 20–25 % упрочняющих фаз (рис. 1). Общее содержание скандия (или скандия вместе с иттрием) в материале порошка не должно превышать 1 мас. %.

Гексаборид лантана намного увеличивает прочность сцепления покрытия с основой, а также износостойкость покрытий, образуя с никелем при температурах 1500–1600 °С соединения типа $\text{LaNi}_{12}\text{B}_6$. Нитрид алюминия повышает износ- и жаростойкость. Двойной карбид титана и хрома увеличивает износ- и жаростойкость, как при комнатной, так и повышенных температурах.

Как указано выше, для нанесения таких покрытий, используется в основном плазменная установка марки «Киев-7» с модернизированным плазмотроном марки ПУН-1, на подложки из материалов марок: ВТ3-1, ЖС6У, ВЖЛ-12У и т.п.

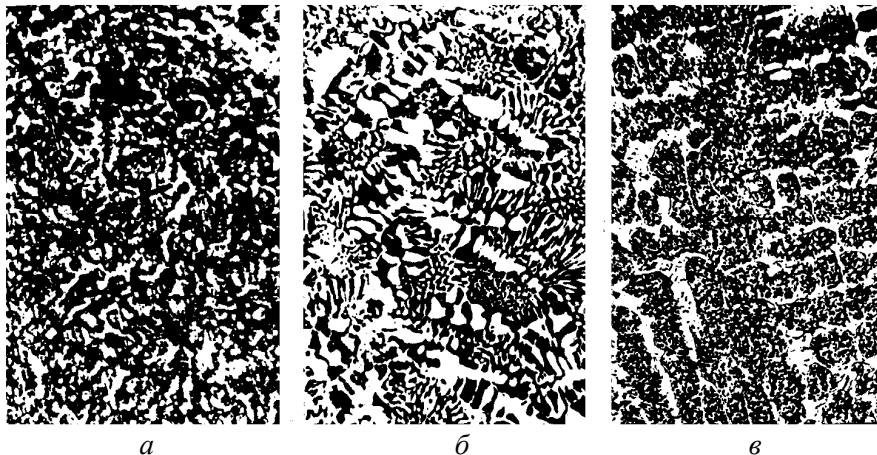


Рис. 1. Микроструктура сплава Ni-Cr-(Al-Sc) с разным мас. % соотношением в них компонентов, $\times 250$; а – 5,9Ni – 1,4Cr – 1,0(Al-Sc); б – 3,8Ni – 3,5Cr – 1,0(Al-Sc); в – 3,3Ni – 1,3Cr – 1,0(Al-Sc)

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН-3,0, в монохроматизированном $\text{Mo}_{\text{K}\alpha}$ излучении. Рентгенограммы показали, что основу жароизносостойких покрытий составляет γ -твёрдый раствор хрома в никеле с добавками тугоплавких соединений.

Микроструктура (изученная на микроскопе МИМ-9) в основном имеет слоистый характер, с эвтектической структурой исходного материала и фаз внедрения, являющихся базовыми карбидами (или нитридами) с высокой твёрдостью.

Граница раздела покрытие-основа не содержит раковин, отслоения или трещин для данных покрытий.

Прочность сцепления определялась на разрывной машине МР-5, для разных основ она составляла 60–85 МПа, а с основой из ВТЗ-1, для одного из материалов покрытия, она равна 100–105 МПа.

Микротвёрдость ($H_{\text{ц}}$) и твёрдость по Роквеллу (HRA) соответственно измеряли на приборах ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76) и ТК-201 (ГОСТ 9013-75), при шероховатости поверхности такой же, как и при исследовании твёрдости порошковых проволок. Микротвёрдость составляет 6,2–7,0 ГПа (эвтектическая структура) и 15–17 ГПа (карбиды, нитриды, бориды), а твёрдость по Роквеллу соответственно 67–71 ед.

Испытания при трении скольжении без смазки на воздухе проводили на машинах трения СМЦ-2 и УМТ-1 при нагрузке $P = 1$ МПа, скорости скольжения $V = 0,5$ м/с и температуре $T = 20$ °С. Износ поверхности покрытий составляет 10–13 $\text{мм}^3/1000 \text{ м}\cdot\text{см}^2$ в зависимости от состава материала и его % соотношения между собой. Контртело из вольфрамовых сплавов марок ВК-15 и ВК-20 (ГОСТ 3882-74).

Испытания на износ при фреттинге проводили на машине трения марки МФК-1, с использованием пары образцов с одноименным покрытием. Режимы испытаний: удельная нагрузка $P = 20$ МПа, амплитуда виброперемещений $A = 0,1$ мм, частота колебаний $f = 30$ Гц, температура испытаний $T = 20$ °С, база испытаний $N = 5 \cdot 10^5$ циклов. Износ на фреттинг находится в пределах 9–11 мкм.

А также при режимах испытаний: удельная нагрузка $P = 5$ МПа, амплитуда виброперемещений $A = 2,5$ мм, частота колебаний $f = 30$ Гц, температура испытаний $T = 20$ °С, база испытаний $N = 1,1 \cdot 10^5$ циклов. Износ на фреттинг находится в пределах 25–30 мкм.

Остаточные напряжения в покрытиях определяли методом послойного стравливания напряжённых слоёв по методу Давиденкова [7]. В материалах по-

крытый фиксируются напряжения сжатия, максимум которых достигает 300–400 МПа и находится на расстоянии 30–40 мкм от основы. По мере удаления от основы остаточные напряжения уменьшаются в направлении поверхности покрытия, где происходит их полная релаксация.

Результаты всех испытаний по определению средних значений физико-механических свойств покрытий обрабатывались в соответствии с ГОСТ 23.211–80.

Выводы. Исходя из вышеизложенного материала, можно отметить, что создан ряд порошковых проволок содержащих в составе шихты скандий в виде лигатуры AlSc (сплав AC95-5), который значительно повышает физико-механические свойства покрытий, особенно износостойкость при трении скольжении на воздухе и при износе на фреттинг. Области применения покрытий из порошковых проволок: автомобильная, тракторная, сельскохозяйственная, железнодорожная и т.д. (восстановление шеек коленчатых валов транспортных средств, валов компрессоров, т.п.).

Разработанные порошковые материалы на основе Ni-Cr-(Co)-Al-Y с различными добавками сплавов и металлов, содержащие в своём составе скандий вместо иттрия, повышают: жаростойкость; износостойкость при трении скольжении на воздухе и при износе на фреттинг; твёрдость как при обычных, так и высоких температурах; прочность сцепления с основой. Особенно это заметно при исследовании физико-механических свойств покрытий, где одновременно содержится вместе скандий и итрий в материале порошка (50%Sc-50%Y) для напыления. Данные порошковые материалы для покрытий хорошо напылять на камеры сгорания ГТД самолётов и вертолётов, поверхности бандажных полок лопаток ГТД, рабочие лопатки вентиляторов двигателей, фланцевые соединения сопловых аппаратов ГТД, монорельсы основного звена закрылков СЧК самолёта, данных летательных аппаратов. Область применения жароизносостойких покрытий; авиационная, космическая, газотурбинная и т.п.

Для разработки порошковых проволок и порошковых материалов для электродугового и плазменного методов напыления, в основном была использована сырьевая база Украины.

Список литературы

1. Фень Е. К. Перспективное использование скандия при создании жароизносостойких газотермических покрытий / Е. К. Фень // Сборник «Тугоплавкие соединения. Получения, свойства и применение». – К.: Изд-во ИПМ НАНУ. – 1999. – С. 114–117.
2. Пашенко В. Н. Восстановление деталей авиационной техники методом сверхзвукового плазменного напыления / В. Н. Пашенко, Е. К. Фень // Сварщик. – 2006. – №5. – С. 26–28.
3. Фень Е. К. Влияние скандия на физико-механические свойства жаро- и износостойких газотермических покрытий / Е. К. Фень // Сварщик. – 2007. – №4. – С. 28–29.
4. Фень Е. К. Износо- и жаростойкие материалы покрытий для сверхзвукового плазменного и электродугового напыления / Е. К. Фень // Сварщик. – 2011. – № 1. – С.32–35.
5. Щаривкер С. Ю. Исследование прочности сцепления детонационно-напыленных покрытий/ С. Ю. Щаривкер, Б. А. Ляшенко, В. В. Ришин, Е. А. Астахов // Проблемы прочности. – 1973. – № 3. – С. 35–38.
6. Голего Н. Л. Фреттинг-коррозия металлов/ Н. Л. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля. – К.: –Техніка. – 1970. – 271 с.
7. Давиденков Н. Н. Измерение остаточных напряжений / Н. Н. Давиденков // ЖТФ. – 1931. –Вып. 1.

М. В. КИНДРАЧУК, С. К. ФЕНЬ, В. М. ПАЩЕНКО

ЖАРОЗНОСОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ (ЩО МАЮТЬ У СВОЄМУ СКЛАДІ СКАНДІЙ), ЯКІ НАПИЛЕНІ ГАЗОТЕРМІЧНИМИ МЕТОДАМИ

Досліджені твердість, міцність зчеплення з основою, інтенсивність зносу при терті ковзанні без мастила та при фретінгу покриттів, які мають у своєму складі скандій. Розроблено кілька видів порошкових матеріалів для плазмового напилення, а також кількох видів складу шихти порошкових дротів для електродугового нанесення покриттів, з різним хімічним складом і відсотковим співвідношенням компонентів між собою.

Ключові слова: скандій, міцність зчеплення, твердість, знос при фретінгу, газотермічні покриття.

М. V. KINDRACHUK, Ye. K. FEN, V. M. PASHSCHENKO

HEAT-RESISTANT AND WEAR RESISTANT COATINGS (CONTAIN OF SCANDIUM) WHICH WAS RECEIVED GASOTHERMIC METHODS

In this work it is represented the scientific workouts of material with strength cohesion, hardness, wear and tear and heat-resistant of coatings which was received by plasma jet and electric arc methods with different properties chemical composition and their percent contents at these components.

Keywords: scandium, strength cohesion, hardness, wear and tear of coatings by fretting, gaso-thermic coatings.

Киндрачук Мирослав Васильевич – д-р техн. наук, профессор, заведуючий кафедри машинобудування, Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина, Kindrachuk@ukr.net.

Фень Евгений Константинович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведуючий лабораториями кафедри інженерія поверхності, Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина.

Пашченко Валерий Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедри інженерія поверхності, Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина.