

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК С МИНЕРАЛЬНЫМИ МОДИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

© 2009 М.П. Лебедев, Г.Г. Винокуров, А.К. Кычкин, Н.Ф. Стручков,  
Д.И. Лебедев

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Проведены сравнительные исследования химического и фазового состава, структуры и микротвердости газотермических покрытий из экспериментальных порошковых проволок с модифицирующими минеральными добавками. Изученные закономерности изнашивания покрытий из порошковых проволок при трении скольжения показали возможность использования минеральных ассоциаций из месторождений Республики Саха (Якутия) в качестве добавок в износостойкие порошковые материалы для получения покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: минеральные добавки, порошковые материалы, эксплуатационные свойства

Разработка и применение высокоинтенсивных технологических процессов обеспечивают использование сложных комплексных руд и многообразных отходов горнодобывающего производства для создания материалов многоцелевого назначения. Поэтому актуальными являются новые подходы к переработке и применению минерального сырья для получения материалов и покрытий, основанные на воздействии на минералы концентрированных потоков энергии (наплавка, электрошлаковый переплав, плазменно-дуговая обработка и др.), позволяющих в одном цикле восстанавливать природные оксиды и синтезировать новые соединения.

**Целью данной работы** является установление особенностей формирования состава, структуры и свойств износостойких

электрометаллизационных покрытий из порошковых проволок с минеральными модифицирующими добавками, выявление закономерностей процессов их изнашивания при трении скольжения.

В работе проведено комплексное исследование основных факторов, определяющих износостойкость электрометаллизационных покрытий с минеральными модифицирующими добавками: химического и фазового состава, микротвердости и структуры покрытия; выявлены закономерности процессов изнашивания поверхности трения. Основным материалом шихты порошковой проволоки был выбран промышленный порошок ПГ-СР4, который широко применяется для получения износостойких порошковых покрытий. В качестве модификаторов износостойкого порошкового покрытия были использованы комплексные концентраты Нижне-Куранахского (содержание: оксиды  $TiO_2$  – 20%,  $Nb_2O_5$  – 4,1% и триоксиды редкоземельных металлов от 4% до 8% масс.) и редкоземельного Томторского (содержание:  $Nb_2O_5$  от 5,03% до 13,56%, триоксиды редкоземельных металлов от 15,45% до 31,03% масс.) месторождений Республики Саха (Якутия).

---

*Лебедев Михаил Петрович, доктор технических наук, заместитель директора. E-mail: m.p.lebedev@prez.ysn.ru*

*Винокуров Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, заведующий сектором. E-mail: g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru*

*Кычкин Анатолий Константинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник*  
*Стручков Николай Федорович, научный сотрудник. E-mail: struchkov\_n@rambler.ru*

*Лебедев Дмитрий Иосифович, ведущий инженер. E-mail: Uranhai@rambler.ru*

Порошковая шихта с минеральными модифицирующими добавками измельчалась и просеивалась на фракцию с дисперсностью от 40 мкм до 200 мкм на пробоподготовительном комплексе. Были подготовлены порошковые шихты с добавками ильменитового концентрата от 8% до 20% по массе (составы №2 – 4), с добавками редкоземельного концентрата от 3% до 9% по массе (составы №5 – 7) и контрольный состав порошковой шихты без минерального сырья (состав №1). Перед изготовлением порошковой проволоки подготовленные шихты смешивались в установке типа «пьяная бочка» в течение 1 часа до получения однородной смеси. В качестве оболочки порошковой проволоки использовалась лента листовой стали Ст 08 кп (ГОСТ 1050-88) толщиной 0,4 мм и шириной 9 мм. Изготовление порошковой проволоки диаметром 1,8 мм проведено на промышленном стане по технологическим режимам, учитывающим скорость подачи шихты в стальную ленту оболочки для обеспечения требуемого коэффициента порошковой набивки.

В качестве подложек покрытий использовались образцы для испытания на износ из конструкционной стали Ст3, которые проходили предварительную подготовку дробеструйной обработкой и обезжириванием. Покрытия были нанесены электродуговой металлизацией поверхности образцов порошковыми проволоками на промышленной установке ЭДУ-500С. Для исследования состава, структуры, свойств были изготовлены поперечные металлографические шлифы покрытий. Средние значения химического состава покрытий определены по данным спектрального анализа на установке «WAS Foundry-Master»; металлографические исследования структуры проведены на микроскопе «Neophot-32»; микротвердость покрытий измерена на приборе «ПМТ-3М». Рентгеноструктурные исследования фаз покрытия проведены на установке ДРОН-3 с использованием монохроматического  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения. Испытания на износ покрытий проводились на машине трения СМЦ-2; на основе анализа работ и методик испытаний на износ была выбрана схема трения «диск-колодка»; износ определялся

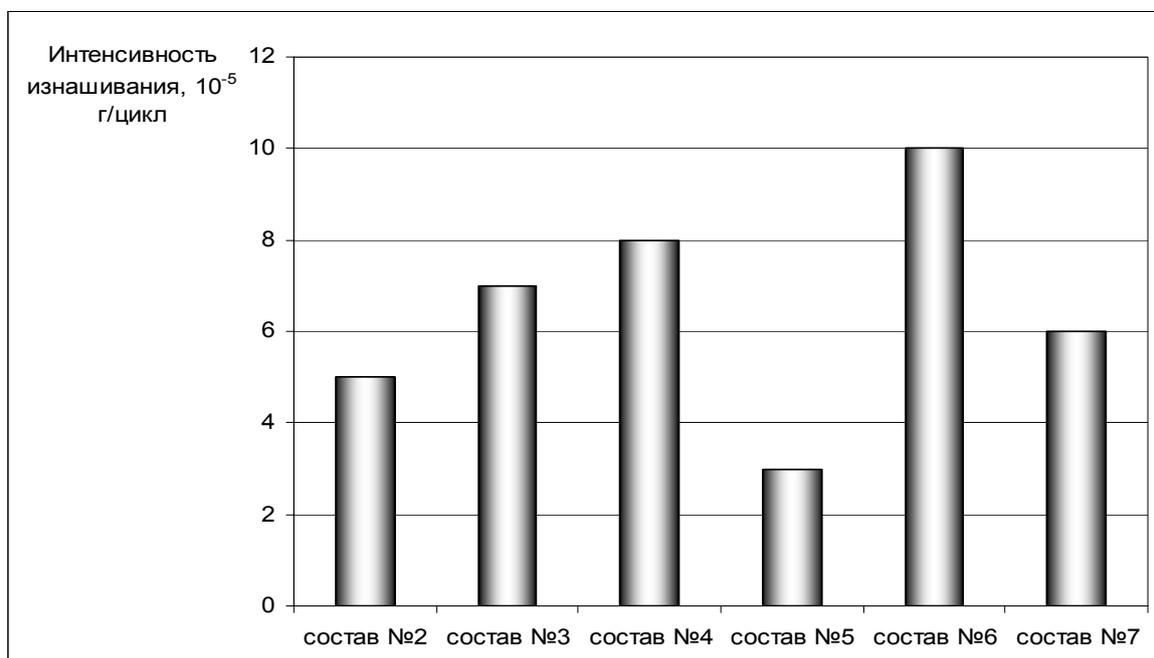
весовым способом. Режимы испытаний на износ: нагрузка – 38 кГ; частота вращения вала – 5 об/сек; трение сухое. Для измерения шероховатости поверхности трения на каждом образце были промаркированы четыре диаметрально противоположных участка покрытия. Шероховатость поверхности трения определялась с помощью профилометра SJ-201P фирмы «Mitutoyo» (Япония). Измерение шероховатости проводилось на каждом из 4-х участков, затем данные усреднялись по всей поверхности трения.

Для формирования упрочняющих фаз определяющее значение имеет химический состав порошкового покрытия. При добавлении минеральных ассоциаций в состав проволок среднее содержание углерода в покрытиях повышается от 0,22% до 0,57%. В покрытиях из порошковых проволок содержание углерода определяет склонность к образованию карбидов железа, хрома, вольфрама, кремния – упрочняющих фаз с высокой твердостью. Высокое содержание никеля ( $\approx 20\%$  и более) в покрытиях из порошковых проволок указывает на более высокий температурный запас вязкости и меньшую склонность к хрупкому разрушению. Все карбидные фазы покрытий обладают высокой температурой плавления и высокой твердостью. Следует отметить, что фазы внедрения покрытий трудно растворимы; даже при очень высоком нагреве они могут не перейти в твердый раствор. Силициды обеспечивают защиту от окисления и жаропрочность; интерметаллиды, найденные во всех покрытиях, также обеспечивают их упрочнение. С целью выявления особенностей структуры покрытий из порошковых проволок проведен их металлографический анализ. При электродуговой металлизации формирование покрытия происходит наложением расплавленных частиц, состоящих из фаз оболочки и порошковой набивки. Тугоплавкие компоненты порошкового материала выделяются в виде отдельных нерасплавленных частиц, все покрытия из проволок характеризуются неоднородной микроструктурой и состоят из множества отдельных фаз.

Установлено, что в отличие от технологий напыления порошкообразного материала, электродуговая металлизация порошковых проволок приводит к более сложным формам частиц покрытия, отклоняющимся от сферической и эллипсоидальной; сечения частиц имеют преимущественно лентообразный изогнутый вид. Составы покрытий имеют сложную внутреннюю структуру, состоящую из изогнутых лентообразных прослоек различных оттенков; также наблюдаются круглые фазовые включения разного диаметра и оттенка. Отмеченные особенности микроструктуры отражаются на значениях микротвердости покрытий, зависящих от количества, состава, распределения фаз, особенностей внутреннего микростроения слоев, образованных расплавленными и кристаллизовавшимися частицами. Как показал анализ структуры покрытий, для более полного расплавления модифицирующей добавки из ильменитового концентрата при электродуговой металлизации необходимо уменьшить

дисперсность фракционного состава (ниже 100 мкм).

Испытаниями на износ установлено, что на стадии приработки контактных поверхностей, до  $\approx 150000 - 20000$  циклов машины трения (по выбранной схеме трения один цикл соответствует пути трения, равному  $1,96 \times 10^{-2}$  м), интенсивность изнашивания нестабильна, что объясняется изменением фактической площади контакта, увеличение и стабилизация которой определяют наступление режима установившегося износа. Поэтому по тангенсу угла наклона прямой установившегося массового износа для всех покрытий с минеральными модифицирующими добавками были определены интенсивности установившегося изнашивания (рис. 1). Как видно из графика, для получения износостойких покрытий наиболее перспективными являются ильменитовые и редкоземельные минеральные модифицирующие добавки с малой концентрацией (менее 8% и 3% по массе соответственно).



**Рис. 1.** Интенсивности изнашивания покрытий из порошковых проволок с минеральными добавками

Профилометрическими измерениями выявлено, что механизм процесса истирания покрытий из порошковых проволок с модифицирующими минеральными добавками состоит в постепенном уменьшении

размера выемок на поверхности трения с ее сглаживанием, что приводит к колебаниям средней шероховатости поверхности трения.

### **Выводы:**

1. Электродуговой металлизацией получены износостойкие покрытия из экспериментальных порошковых проволок с модифицирующими минеральными добавками. Химический состав порошковых проволок с минеральными модифицирующими добавками способствует формированию многофазных покрытий, содержащих бориды, карбиды, силициды, интерметаллиды и др.; анализом фаз обнаружено дисперсионное упрочнение покрытий в результате образования карбидов.

2. Минеральные модифицирующие добавки значительно сужают интервал распределения микротвердости покрытий из порошковых проволок и не приводят к большей неоднородности микроструктуры покрытий. По результатам анализа структуры покрытий, для более полного расплавления модифицирующей добавки из ильменитового концентрата при электродуговой металлизации необходимо умень-

шение дисперсности фракционного состава (ниже 100 мкм).

3. Испытания в условиях трения скольжения показали, что для всех покрытий наблюдаются практически одинаковые характерные участки приработки и установившегося износа. Механизм процесса истирания покрытий из порошковых проволок с модифицирующими минеральными добавками состоит в чередовании процессов появления все мелких выемок на поверхности трения и их сглаживания, что приводит к колебаниям средней шероховатости поверхности трения. Для получения износостойких покрытий наиболее перспективными являются ильменитовые и редкоземельные минеральные модифицирующие добавки с малой концентрацией (менее 8% и 3% по массе соответственно).

Работа выполнена при поддержке инновационного проекта № 6781 Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы СТАРТ.

## **RESEARCH THE WEARPROOF ELECTROMETALIC COATINGS FROM POWDER WIRES WITH MINERAL MODIFYING ADDITIVES**

© 2009 M.P. Lebedev, G.G. Vinokurov, A.K. Kychkin, N.F. Struchkov, D.I. Lebedev

Institute of Physicotechnical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

Are carried out comparative researches of chemical and phase compound, structure and microhardness thermogas coverings from experimental powder wires with modifying mineral additives. The studied laws of wear process of coverings from powder wires at a sliding friction have shown an opportunity of use the mineral associations from deposits of Republic Saha (Yakutia) as additives in wearproof powder materials for reception of coverings with raised operating abilities.

Key words: mineral additives, powder materials, operational properties

---

*Mikhail Lebedev, Doctor of Technical Sciences,  
Deputy Director. E-mail: m.p.lebedev@prez.ysn.ru  
Gennadiy Vinokurov, Candidate of Technical Sciences,  
Sector Manager. E-mail: g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru  
Anatoliy Kychkin, Candidate of Technical Sciences,  
Senior Research Fellow  
Nikolay Struchkov, Research Fellow.  
E-mail: struchkov\_n@rambler.ru  
Dmitriy Lebedev, Chief Engineer.  
E-mail: Uranhai@rambler.ru*