

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials / O. Coussy, P. Dangla, T. Lassabatère, V. Baroghel-Bouny // *Materials and Structures*. – 2004. – Vol. 37, iss. 1. – P. 15–20.
2. Maruyama, I. Origin of Drying Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hydration Pressure / I. Maruyama // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2010. – Vol. 8, iss. 2. – P. 187–200.
3. Mainguy, M. Role of Air Pressure in Drying of Weakly Permeable Materials / M. Mainguy, O. Coussy, V. Baroghel-Bouny // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2001. – Vol. 127, iss. 6. – P. 582–592.
4. Maekawa, K. Multi-scale Modelling of Structural Concrete / K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi. – New York : Taylor & Francis Group, 2009. – 655 p.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

**Овчинников¹ Е. В., Лунь² В. И., Свистун³ А. Ч., Линник⁴ Д. И.
Веремейчик⁵ А. И., Белоусов⁶ Д. В.**

¹ Д. т. н., профессор кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, ovchin@grsu.by

² Главный механик, ОАО «Гродненский стеклозавод»
Гродно, Беларусь, sgm2@grodnoglass.by

³ К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, svistun_ach@grsu.by

⁴ К. т. н., декан инженерного факультета
УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»
Гродно, Беларусь, d.linnik@grsu.by

⁵ К. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики
УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, vai_mrtm@bstu.by

⁶ Магистрант, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь
Belousov_DV_23@student.grsu.by

Электроискровое легирование (ЭИЛ) – перспективный метод создания наноструктурированных материалов, открытый советскими учеными Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Данные исследования заложили фундамент для развития целых научных школ на постсоветском пространстве, посвященных совершенствованию и расширению возможностей этой технологии. Суть метода заключается

в формировании модифицированного поверхностного слоя на проводящем материале путем многократных разрядов электрической дуги между электродом (инструментом) и обрабатываемой поверхностью. При этом возможно применять порошковый материал, частицы которого плавятся и внедряются в поверхностный слой обрабатываемой детали, создавая композиционное покрытие. Этот процесс отличается высокой интенсивностью энергетического разряда, локальностью воздействия и возможностью управления составом и структурой формируемого слоя. Применение порошковых материалов в ЭИЛ открывает широкие возможности для создания материалов нового поколения с уникальными свойствами. В частности, использование тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, тантал, ниобий) и их карбидов, нитридов, боридов, а также графита, позволяет получать покрытия с высокой твердостью, износостойкостью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью. Например, добавление в порошковую шихту при изготовлении электрода для электроискрового легирования карбида вольфрама значительно повышает твердость и износостойкость модифицируемой стали, а введение графита – улучшает ее смазывающие свойства. Комбинации различных порошковых материалов для электродов позволяют создавать покрытия с оптимизированными характеристиками для конкретных условий эксплуатации. Однако, несмотря на очевидные преимущества, широкое промышленное применение ЭИЛ сдерживается рядом факторов. В первую очередь, это недостаток глубокого понимания физических и химических процессов, протекающих во время электроискрового разряда. Не до конца ясны механизмы формирования наноструктур, влияния параметров процесса (ток, напряжение, частота импульсов, подача порошка) на свойства покрытия, а также факторы, определяющие ресурс инструмента и долговечность получаемых покрытий. Отсутствие адекватных математических моделей и программного обеспечения для предсказания свойств покрытия на стадии проектирования значительно затрудняет оптимизацию технологического процесса. Другой важной проблемой является недостаток практического опыта работы с ЭИЛ установками, особенно теми, которые используют порошковые материалы. Недостаточно разработаны методы контроля качества получаемых покрытий, которые бы обеспечивали достоверную оценку их свойств и соответствия требованиям. Проверка равномерности толщины, микротвердости, фазового состава, наличия пор и трещин требует применения специальных методов. В связи с этим, актуальность исследований в области ЭИЛ остается высокой. Необходимы дальнейшие фундаментальные исследования в области физики электроискрового разряда, разработка новых математических моделей и методов компьютерного моделирования, позволяющих предсказывать свойства ЭИЛ покрытий исходя из параметров технологического процесса. Особое внимание следует уделить совершенствованию ЭИЛ установок, обеспечению их надежности и удобства в эксплуатации, а также разработке простых и эффективных методов контроля качества покрытий. Важной задачей является разработка системы технологического сопровождения, которая бы предоставляла инженерам и технологам необходимую информацию и рекомендации по выбору оптимальных параметров процесса и контролю качества формируемых

покрытий для решения конкретных производственных задач. Перспективным направлением является разработка интеллектуальных систем управления процессом ЭИЛ, способных адаптироваться к изменяющимся условиям в процессе формирования ЭИЛ и обеспечивать высокое качество покрытия. Это может быть достигнуто путем использования сенсорных систем, обратной связи и методов машинного обучения. Внедрение таких систем позволит значительно повысить эффективность и точность процесса ЭИЛ, сделать его более доступным и расширить область применения данной технологии.

Основными преимуществами ЭИЛ является получение высокой адгезионной прочности по сравнению, например, с газотермическим нанесением покрытий, возможность получения модифицированных поверхностных слоев и покрытий на подложке без предварительной подготовки, отсутствие объемного разогрева изделия, возможность не проводить финишную механическую обработку модифицированного изделия, использование метода в кислородсодержащей среде. Представляет интерес синтез МАХ-фаз методом ЭИЛ, который легко осуществим, а также отличается низкими энергозатратами. В ходе исследований были синтезированы МАХ-фазы в виде покрытий непосредственно на поверхностях, требующих защиты от коррозии, износа и т. п. Для получения МАХ-фаз методом ЭИЛ на конструкционной стали 20 и 40 использовали электрод на основе соединения Т15К6. При этом использовались стехиометрические смеси соответствующих порошков.

Адгезионные характеристики электроискровых покрытий оценивались методом скретч-анализа [1]. Оптимальный режим, при котором могут достигаться наиболее высокие значения адгезионного взаимодействия, определялись при частоте вибрации обрабатывающего электрода от 30 до 100 Гц. В качестве источников импульсных разрядов использовались как промышленные, так и экспериментальные установки. Процесс ЭИЛ проводили в диапазоне значений энергии разряда от 0,3 до 10,0 Дж. Установлено, что высокие значения адгезионной прочности и износостойкости для покрытий на основе Т15К6 обусловлены формированием в структуре покрытий МАХ-фаз. Эффект формирования большого количества МАХ-фаз в покрытии происходит при энергиях импульса в диапазоне 8–10 Дж. Проведено упрочнение методом ЭИЛ полумуфт зубчатых. Установлено увеличение эксплуатационного ресурса модифицированных деталей в три раза.

Список использованных источников

1. Овсянников, Е. В. Электроискровые покрытия: структура, свойства, технология формирования: монография / Е. В. Овсянников ; учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы». – Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2022. – 254 с.