

$$k_B T_C = \frac{2zJS(S+1)}{3}, \quad (6)$$

где $z = 6$ – число ближайших соседей, $T_C = 414$ К – температура магнитного упорядочения. Вычисленное по формуле (6) значение обменного интеграла $J = 8.2$ см⁻¹ оказалось близко к значению, определенному по формуле (5) и близко к теоретическим оценкам $J = 3.9 - 5.4$ см⁻¹, полученным в работе [5].

Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А19-119092390079-8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев, А.И. Магнитный фазовый переход в нанопроволоках ϵ - $\text{In}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ / А.И. Дмитриев, О.В. Коплак, А. Namai, Н. Tokoro, S. Ohkoshi, Р.Б. Моргунов // Физика твердого тела. – 2013. – 55, 11. – С. 2140–2147.
2. Дмитриев, А.И. Спин-переориентационный переход в нанопроволоках ϵ - $\text{In}_{0.24}\text{Fe}_{1.76}\text{O}_3$ / А.И. Дмитриев, О.В. Коплак, А. Namai, Н. Tokoro, S. Ohkoshi, Р.Б. Моргунов // Физика твердого тела. – 2014. – 56, 9. – С. 1735–1738.
3. Sperl, M. Spin-wave excitations and low-temperature magnetization in the dilute magnetic semiconductor (Ga,Mn)As / M. Sperl, A. Singh, U. Wurstbauer, S. Kumar Das, A. Sharma, M. Hirmer, W. Nolting, C.H. Back, W. Wegscheider, G. Bayreuther // Physical Review B. – 2008. – 77, 12. – P. 125212.
4. Goennenwein, S.T.B. Spin wave resonance in $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ / S.T.B. Goennenwein, T. Graf, T. Wassner, M.S. Brandt, M. Stutzmann // Applied Physics Letters. – 2003. – 82, 5. – P. 730–732.
5. Ohkoshi, S. Hard Magnetic Ferrite: ϵ - Fe_2O_3 / S. Ohkoshi, Н. Tokoro // Bulletin of the Chemical Society of Japan. – 2013. – 86, 8. – P. 897–907.

УДК 621.357.7

А.В. Красиков, А.А. Каширина, М.В. Старицын, М.В. Меркулова
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,
Санкт-Петербург, Россия

СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ВИБРАЦИОННО-СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ СУСПЕНЗИИ

Композиционные электрохимические покрытия (КЭП) на основе системы Ni-SiC в настоящее время применяются в двигателестроении и известны под маркой Nicom или Nicasil. Данные покрытия обладают

высокими механическими свойствами и обеспечивают надежную работу пар трения. Несмотря на все преимущества, области применения КЭП сильно ограничены в виду сложности поддержания агрегативной устойчивости электролита-суспензии. Использование виброожиженного слоя позволяет решить многие проблемы, связанные с седиментацией даже весьма крупных порошков фракции М5, взвешенных в растворе [1, 2] и обеспечить доставку частиц карбида кремния к поверхности сложнопрофилированных изделий.

Целью данной работы было исследование структуры КЭП Ni-SiC, полученных из вибрационно-стабилизированной суспензии.

Исследование структуры поверхности покрытий, проведенные с помощью электронного микроскопа, выявляют существенный рельеф. Поверхность покрытия покрыта своеобразными каралловидными образованиями (или кораллитами), не характерными для гальванических никелевых слоев (рис. 1). Более детальное исследование поверхности осажденных КЭП при большом увеличении не позволяет выявить наличие частиц карбида кремния. В промежутках между корралоподобными образованиями поверхность покрытия имеет структуру классического никелевого гальванопокрытия, полученного без добавок.

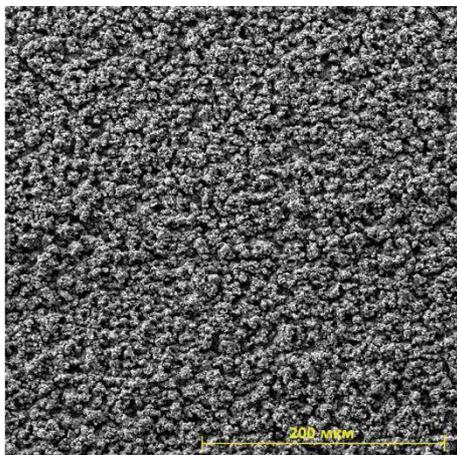


Рисунок 1 - Структура поверхности композиционного покрытия Ni-SiC

Металлографическим методом показано, то при использовании субмикронного порошка, полученного методом помола, происходит осаждение корралоподобных структур, образованных частицам SiC, покрытыми металлической оболочкой, что объяснено поверхностной проводимостью частиц. При этом рельеф осажденного покрытия определяется именно этими структурами. Пример такой корралоподобной структуры в покрытии приведен на рис. 2.

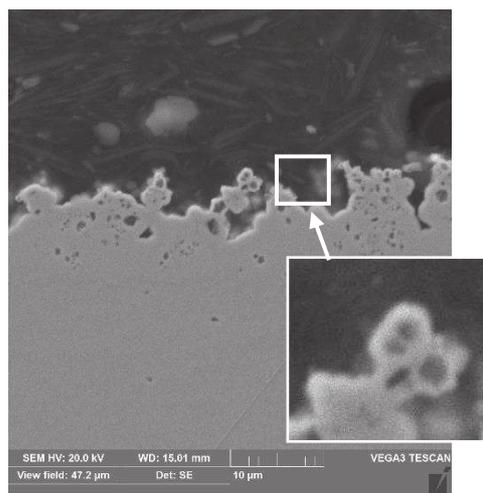


Рисунок 2 - Поперечное сечение композиционного покрытия Ni-SiC

При долгосрочном осаждении композиционных покрытий рельеф поверхности уменьшается. Исследование поперечных шлифов таких покрытий выявляют микронеоднородности в распределении частиц SiC, которые формируют неупорядоченную ячеистую структуру (рис. 3). Показано, что неоднородность структуры композиционного покрытия Ni-SiC обусловлена тем, что частицы порошка в виброоживленном электролите перемещаются в форме агломератов. Благодаря тому, что частицы обладают поверхностной проводимостью, в момент их контакта с поверхностью происходит образование металлической прослойки между частицами и формирование упомянутых выше структур.

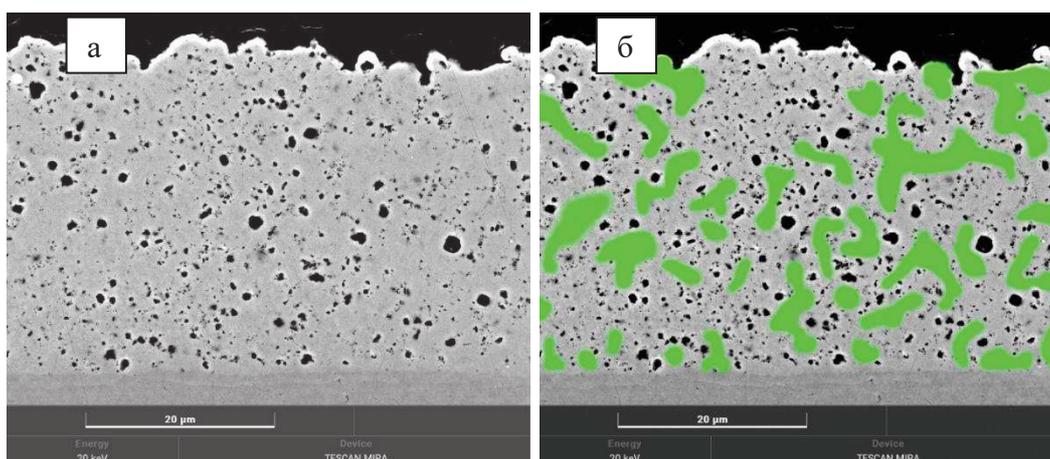


Рисунок 3 - Поперечное сечение композиционного покрытия, сформированного при продолжительном осаждении 2,5 ч при плотности тока 2 А/дм² и частоте колебаний 50 Гц: исходное изображение (а); визуализация областей, бедных SiC (б)

Проведенные металлографические исследования позволяют сделать предположение о механизме формирования структуры покрытия. Вынужденная конвекция электролита суспензии, вызванная вибрацией, доставляет все новые и новые агломераты из частиц SiC, которые, касаясь катода, фиксируются на поверхности, превращаясь в металлокерамические кластеры. Поскольку электропроводность этих кластеров существенно ниже, чем у чистого металлического никеля, локальные потенциалы на катоде перераспределяются, и захват новых агломератов становится менее вероятным. В то же время, значительно повышается локальная плотность тока в промежутках между кластерами, и они заполняются никелем. На некоторой стадии заполнения локальные потенциалы вновь перераспределяются, и фиксация агломератов SiC с последующим превращением их в металлокерамические кластеры вновь становится возможной. Таким образом, формируется своеобразная скелетная структура покрытия.

Полученные композиционные покрытия были испытаны на износостойкость в паре трения «кольцо-кольцо» против контртела с корундовым напылением. Контактное давление составляло 1 МПа, скорость вращения образца относительно неподвижного контртела – 60 об/мин и с водяной смазкой. Оценка изменения массы образцов показала, что скорость изнашивания покрытия в 2-2,5 раза ниже, чем у контртела. В отличие от никелевых покрытий, которые разрушались и отслаивались при схожих условиях эксперимента, композиционное покрытие с легкостью выдержало испытание.

Проведенные исследования показывают, что композиционные покрытия, осажденные из виброоживленного слоя, не только обладают особой структурой, обусловленной уникальным механизмом формирования, но и значительной износостойкостью, что позволяет применять их в высоконагруженных парах трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красиков А.В., Агафонов Д.В., Марков М.А., Быкова А.Д., Беляков А.Н., Кравченко И.Н., Галиновский А.Л., Кузнецов Ю.А. Электроосаждение композиционного покрытия Ni-SiC из вибрационно-стабилизированного электролита суспензии // Электротехнология. 2022. № 7. С. 3-12.

2. Krasikov A.V., Markov M.A., Krasikov V.L., Kravchenko I.N., Staritsyn M.V., Bykova A.D., Belyakov A.N. Influence of vibration parameters during electrodeposition of Ni-SiC composite coatings from a vibration stabilized suspension // Journal of machinery manufacture and reliability. 2022. V.51, N. 4. P. 300-305.