

Влияние карбида вольфрама на процесс осаждения и свойства новых композиционных гальванических покрытий Fe-WC

Д. М. Кройтору^{a*}, С. Х. Ивашку^a, Н. И. Цынцару^{a,b}, С. П. Ющенко^a, С. М. Яцко^a,
В. И. Петренко, С. Т. Склифос^c, Ж. И. Бобанова^a

^aИнститут прикладной физики, Молдавский государственный университет,
 г. Кишинев, МД-2028, Молдова

^bКафедра физической химии, Вильнюсский университет, г. Вильнюс, LT-03225, Литва

^cSRL, AGROFERMOTECN, г. Кишинев, MD-2023, Молдова

*e-mail: dumitru.m.croitoru@gmail.com

Поступила в редакцию 05.02.2024

После доработки 21.02.2024

Принята к публикации 28.02.2024

Электроосаждение износостойких композиций на поверхности деталей позволяет повышать надежность и долговечность машин. Выполнены исследования процесса нанесения композиционных гальванических покрытий (КГП) Fe-WC из электролита-суспензии, содержащего 550–600 г/л FeCl₂·H₂O и микроабразивный порошок карбида вольфрама. Получена высокая включаемость частиц дисперсной фазы в покрытие. Изучены свойства композиционных покрытий Fe-WC. Установлена взаимосвязь между концентрацией частиц карбида вольфрама в электролите и выходом по току композиции, а также содержанием WC в покрытии. Определены некоторые физико-механические свойства КГП без их предварительной механической обработки, в частности, микротвердость и износостойкость. Исследована шероховатость композиций Fe-WC в сравнении с покрытиями Fe-Al₂O₃.

Ключевые слова: композиционные гальванические покрытия, карбид вольфрама, микротвердость, износостойкость

УДК 621.357.7

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.2.09>

ВВЕДЕНИЕ

Первоначальной задачей этих исследований было получение на катоде покрытия из Fe-W [1, 2] сплавов, которые заменили бы и хром [3], и железо [4]. Преимущество этих двух металлов известно, и наибольшее применение в промышленности получил хром как металл, обладающий наибольшей износостойкостью и коррозионной стойкостью и обеспечивающий высокую долговечность при эксплуатации в паре с чугуном [5]. А вот что касается недостатков, то здесь следует заметить, что технологический процесс нанесения хромовых покрытий не экологичен и переработка (или захоронение) остатков электролита является проблемой [6, 7]. Технологический процесс железнения с экологической точки зрения опасности не представляет, однако железные покрытия при электро-осаждении не обеспечивают надежное сцепление с подложкой [8] и в считанные часы после нанесения покрываются ржавчиной. При этом процесс имеет высокую производительность, выход по току железа близок к 100% и позволяет получать покрытия толщиной до 0,5–0,7 мм.

На базе электролита для железнения начали создавать суспензии с микроабразивными частицами W₄C, Al₂O₃, SiC и др., из которых осаждают композиции с высокой износостойкостью, последняя в большинстве случаев выше, чем у хрома [9].

Известны композиционные гальванические покрытия (КГП) как продукт, полученный простым электрохимическим способом из гидромеханической смеси электролита (Ni, Fe, Cr и др.) и микропорошка (оксидов, карбидов, сульфидов и др.) дисперсной фазы (ДФ) и названный электролитом-суспензией (ЭС) [10–14]. Исследования процесса электроосаждения ведутся с использованием устройств для перемешивания и поддержания рецептурной концентрации частиц ДФ во всем объеме электролита-суспензии. Применение различных способов активации (центробежное гидродинамическое поле, создаваемое вращением анода в цилиндре [15]; элеваторный способ циркуляции, обеспечиваемый осевой крыльчаткой в вертикальной двухканальной ячейке [16] и др.) ЭС в сочетании с токовым режимом позволяет управлять составом КГП, а вместе с этим и физико-механическими свойствами, главным из которых

является износостойкость. Решающим фактором для повышения последней является микроструктура (размер и концентрация частиц в КГП [17]) поверхности композиции, которая формируется, естественно, в процессе электроосаждения и при ее механической обработке (шлифовке). На поверхности шлифованной композиции частицы ДФ выступают на микрометрическую величину, а во время эксплуатации пары трения они воспринимают нагрузку контртела (выполняют функцию опор) и распределяют ее в матрицу покрытий. Вместе с тем в пространствах между частицами (при определенном размере и расстоянии между ними) формируется масляная «подушка», которая защищает матрицу от износа, и она сохраняется до остановки движения.

Все эти технические решения успешно реализуются в лабораторных условиях, а результаты по износостойкости подтверждены во многих научных центрах. Тем не менее применение композиционных гальванических покрытий в промышленном масштабе ограничено. Это связано с тем, что:

1) скорость роста осадков на катоде очень низкая и варьирует от 30 мкм/час для хрома до 300 мкм/час для железа, поэтому для повышения производительности технологического процесса на гальванических участках делается несколько рабочих мест. Здесь следует заметить, что частицы ДФ не влияют на производительность катодного процесса;

2) прочность сцепления для некоторых КГП, в частности для железных покрытий, ненадежная, и их нанесение на детали, выполняющие ответственную функцию, требует дополнительных исследований;

3) частицы ДФ в электролите поляризуются и в период простаивания ванн оседают на дно, формируя прочный и вязкий слой. Восстановление концентрации частиц ДФ в электролите, особенно для ванн с большим объемом, вызывает некоторые затруднения и требует конкретных технических решений;

4) в процессе нанесения КГП, в котором применяется растворимый стальной анод, в ванне накапливаются остатки анодного раствора – шлам, который смешивается с ДФ, и очистка суспензии от посторонних частиц является проблемой, особенно для железных композиций. Хотя есть мнение, что включение графита анодного раствора в композицию вместе с частицами ДФ улучшает качество покрытий.

Однако, учитывая огромный объем знаний и научной информации, накопленный учеными в области гальваники, а также технический

уровень, оснащенность и возможность современных предприятий, все эти проблемы могут быть успешно решены для широкого внедрения и применения композиционных гальванических покрытий в современном производстве. Поэтому нанесение композиционных гальванических покрытий Fe-WC позволило бы решить две задачи – с одной стороны, получить Fe-W покрытия и устранить частично вышеуказанные недостатки, с другой – осаждать композиционные покрытия, которые имеют высокую износостойкость. Вместе с этим важно исследовать процесс нанесения тонкослойных гальванических композиций специального назначения и применения их в производстве без механической обработки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Процесс нанесения композиционных гальванических покрытий Fe-WC осуществляли из электролита-суспензии, состоящего из раствора $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 550–600 г/л и частиц дисперсной фазы карбида вольфрама (WC) размером 10 мкм (M10). Кислотность электролита $\text{pH} = 0,7$. При этом увеличивали содержание частиц WC в электролите от 0 до 45 г/л. Таким образом, были получены образцы с условным обозначением: Fe-WC-0, Fe-WC-15, Fe-WC-30, Fe-WC-45.

С целью сравнения полученных композиционных покрытий Fe-WC также получали покрытия Fe- Al_2O_3 с применением частиц ДФ из окиси алюминия размерами 1(M1) и 10 (M10) мкм.

Для нанесения покрытий использовали вертикальную двухканальную ячейку с элеваторной циркуляцией суспензии [14], в которой устанавливали в одном канале вал с крыльчаткой для прокачки суспензии, а в другом – держатели катода-образца и анода с токоподводами. Вертикальную прокачку суспензии осуществляли с использованием крыльчатки, установленной на валу электродвигателя ЭМ 150, и крутили при напряжении 12 В.

Электрический ток (1,5 А) в электролизере измеряли вольтамперметром (M2038) с шунтом на 5А(0,075В). Плотность катодного тока при этом составляла 30 А/дм². Время нанесения 10 мин, при этом толщина покрытий равнялась ~ 50 мкм.

Травление образцов выполняли в 30% растворе серной кислоты (с режимом 40 А/дм² в течение 13 с) до приобретения поверхностью образца сероватого (матового) цвета. В качестве образцов (и катода, и анода) использовали пластины из стали 3 с размером 50×10×5.

Шероховатость образцов перед нанесением покрытий составляла 0,33 мкм. Микротвердость

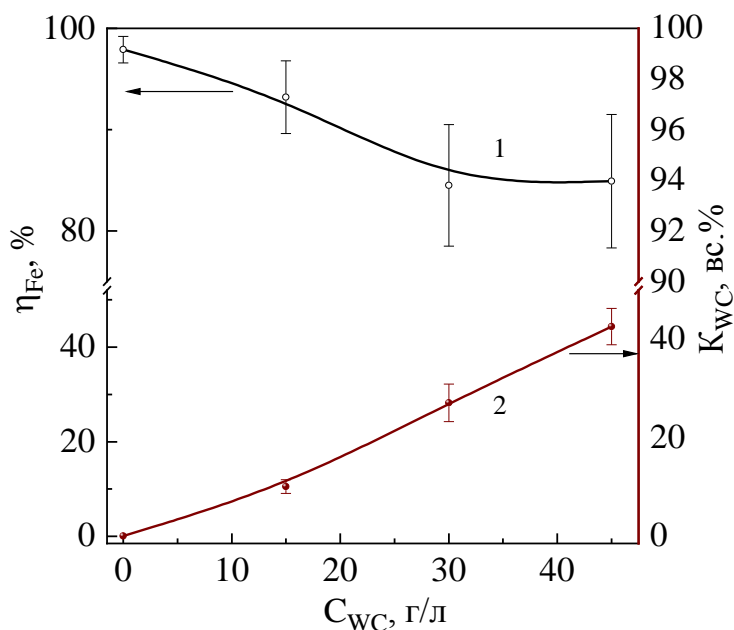


Рис. 1. Зависимость выхода по току железа (1) и концентрации WC в покрытии (2) при электроосаждении композиционных гальванических покрытий Fe-WC с частицами ДФ М10 от содержания частиц в электролите.

композиций измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3, а шероховатость поверхности КТП – профилографом SURTRONIC-25 (TYLOR HOPSON). Элементарный состав композиционных покрытий определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (Xenometrix, Израиль).

Для исследования кристаллической структуры полученных пленок использовали рентгеновский дифрактометр (D2 Phaser, Bruker, Billerica, MA, USA, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}/\text{Cu K}\alpha$). Морфологию композиционных материалов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM, Hitachi Tabletop Microscope TM-3000, Япония), оснащенного модулем EDS (Oxford Instruments, Великобритания).

Испытание композиций (Fe-WC) на износ проводили на машине трения с возвратно-поступательным движением с частотой $n = 3$ двойных хода в секунду (180 дв. х./мин). В качестве контртела использовали образец из стали 45 (закаленная). Твердость образца составляла 27 единиц по Роквеллу (HRC). Ширина кромки контртела, контактирующей с образцом – 2 мм, при этом площадь контакта в паре трения составляла 20 мм². Испытание осуществляли без масла с нагрузкой в паре трения в 2 кг (20N). Один эксперимент длился 10 000 двойных ходов (циклов), но разбит был на четыре этапа по 2500 двойных ходов, то есть нужно было фиксировать изменение износа в динамике. Через специальный электронный блок и соответствующую программу машина трения была адаптирована к компьютеру с регистрацией основных трибологических параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Осаждение композиционных покрытий: структура и состав

Проведенные исследования показали, что включаемость частиц дисперсной фазы из WC в железные покрытия хорошая. При увеличении концентрации частиц ДФ с 0 до 45 г/л в электролите содержание карбида вольфрама в покрытии достигает ~40% от всего объема осажденного композита. На рис. 1 приведены кривые изменения концентрации карбида вольфрама в покрытии и выхода по току железа. При увеличении концентрации частиц в покрытии электроактивная площадь осаждения уменьшается и выход по току железа соответственно падает, достигая минимальных значений при 30–45 г/л (рис. 1).

Дополнительные исследования по нанесению композиционных покрытий с применением микронных (M1) и десятимикронных (M10) частиц белого электрокорунда (Al_2O_3) в тех же условиях показали одинаковую включаемость в состав КТП (для M10) при их концентрации в суспензии в 30 и 45 г/л электролита. Здесь следует заметить, что частицы Al_2O_3 (M1) в 10 раз меньше (по размеру) и 4 раза легче (по удельному весу) ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 4,0 \text{ г/л}$), чем частицы WC (15,77 г/л). Поэтому осевой насос, прокачивающий суспензию по элеваторной схеме, обеспечивал рецептурную концентрацию частиц Al_2O_3 во всем объеме лабораторной ячейки.

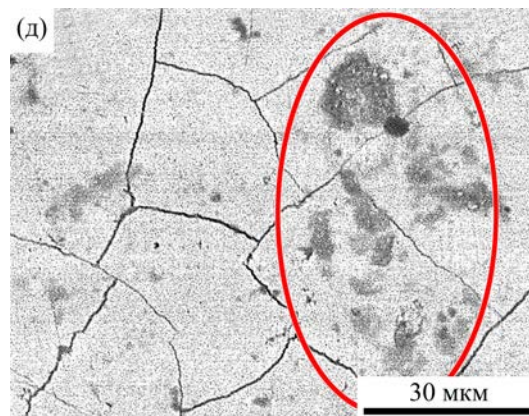
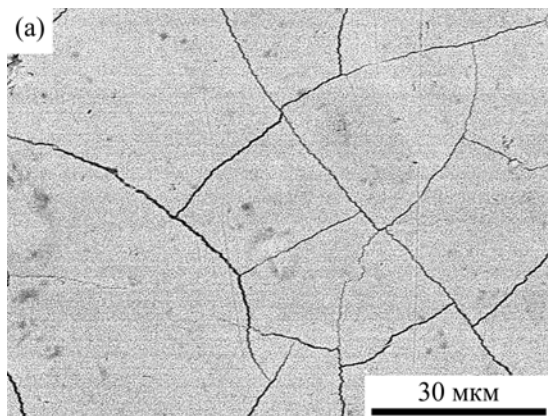
Что касается частиц карбида вольфрама, то из-за их значительного удельного веса (на порядок больше, чем удельный вес электролита) последние, под действием силы тяжести и

Образец

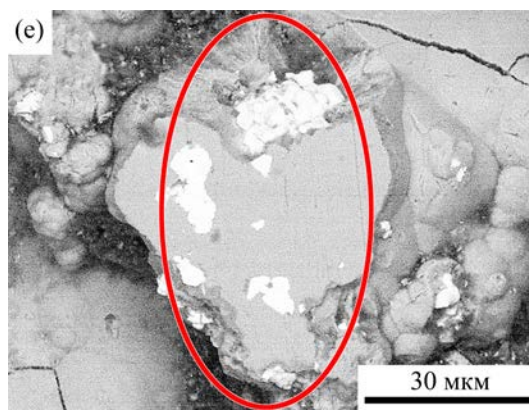
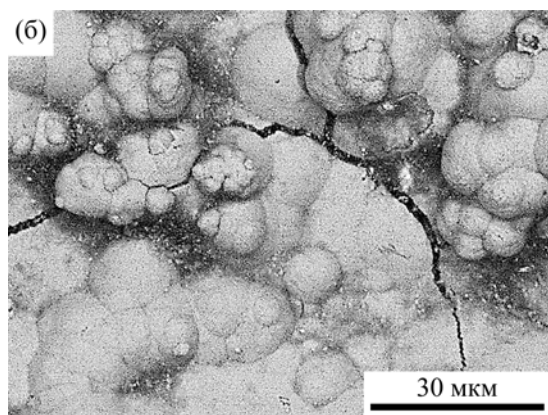
После электроосаждения

После износа

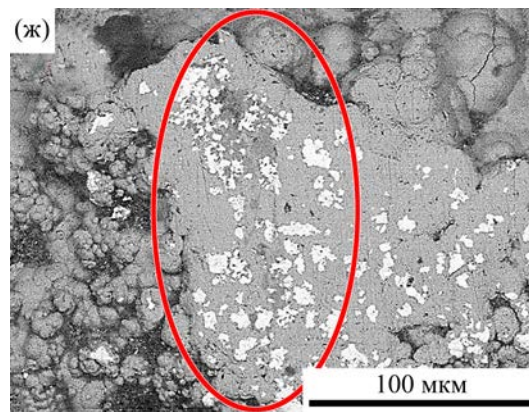
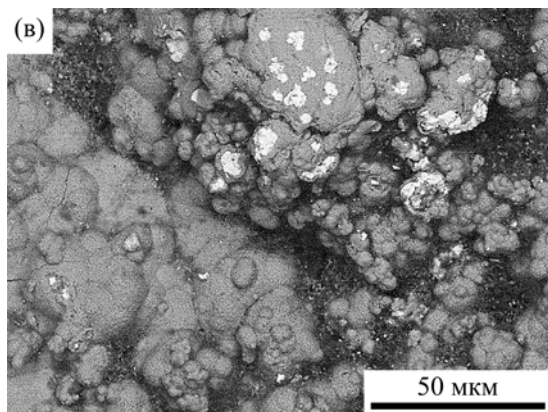
Fe



Fe-WC-15



Fe-WC-30



Fe-WC-45

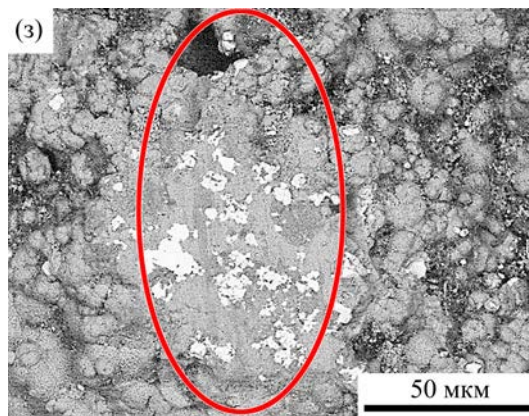
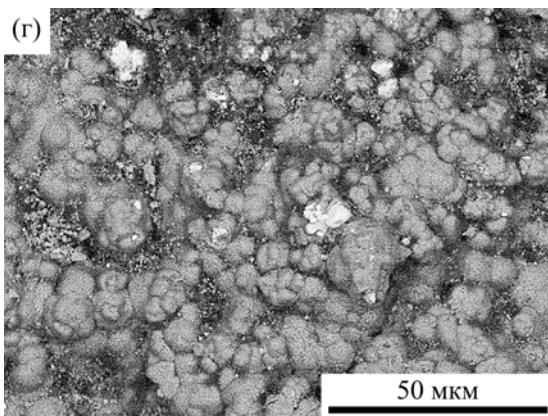


Рис. 2. SEM-изображения полученных покрытий (а–г) и изображения следов износа на поверхности образцов после трибологических испытаний (ж–з). Красным овалом показана область трения.

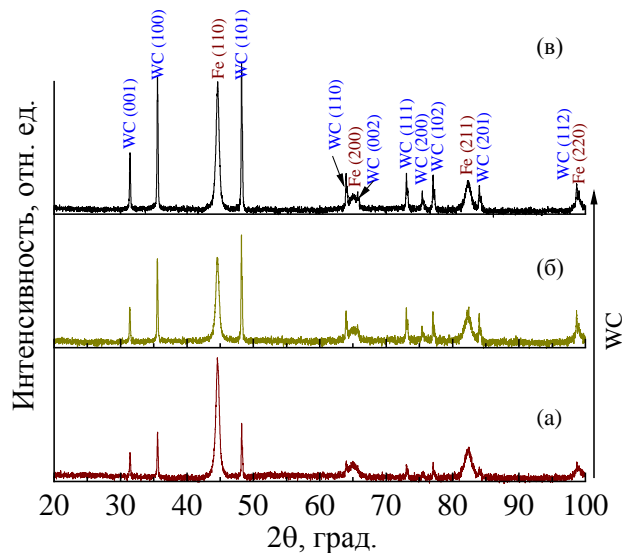


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы композитных покрытий Fe-WC с различным содержанием карбида вольфрама, г/л: 15 (а), 30 (б), 45 (в). Соответствующие пики Fe и WC также приведены на дифрактограмме.

центробежной силы, накапливались в нижней части ячейки, и это требовало дополнительного периодического перемешивания для их возврата в поток суспензии. Общим для обеих частиц является их нейтральность по отношению к электролиту железнения.

Морфология полученных Fe-WC композиционных покрытий, а также электроосажденного железа представлена на рис. 2а–г. Так как электроосаждение проводилось без дополнительных добавок в электролит, была возможность изучить только влияние карбида вольфрама на осаждение, поэтому покрытия получились достаточно трещиноватыми, особенно в случае осаждения только железа (рис. 2а). Эти результаты отличаются от ранее опубликованных нами результатов, полученных для покрытий железа из комплексного электролита [18].

Трещиноватость также может свидетельствовать о том, что полученные покрытия будут напряженными, а это станет сказываться на их микротвердости, как в случае, например, покрытий на основе электроосажденного хрома [19]. Также следует отметить, что с увеличением фазы карбида вольфрама (рис. 2б–г) покрытия становятся менее трещиноватыми, что может указывать на изменение характера нуклеации композиционных покрытий, в том числе на уменьшение кристаллитов за счет смещения потенциала электроосаждения [20]. Безусловно, включение WC приводит к получению более развитой структуры (структуры «цветной капусты») и ощутимому увеличению шероховатости (рис. 3а) соответственно.

Для того чтобы получить более полное представление о структуре и составе изготовленных композитных покрытий, был использован рентгеноструктурный анализ (рис. 3). На рентгенограмме можно отметить следующие кристал-

лографические плоскости (110), (200), (211) и (220) кубической структуры железа (ICDD № 00-006-0696), которым соответствуют пики при $2\theta = 44,59; 64,97; 82,35$ и $98,94^\circ$.

Рентгенограммы также показывают наличие карбида вольфрама, пики при $2\theta = 31,42; 35,5; 48,2; 63,9; 65,7; 73,05; 75,42; 77,06; 84,04$ и $98,6^\circ$ соответствуют шестиугольной кристаллической структуре WC (ICDD № 00-025-1047) и кристаллографическим плоскостям, приведенным на рис. 3в.

При этом по увеличению интенсивности пиков (рис. 3а–в), соответствующих карбиду вольфрама, можно сделать вывод, что максимальное количество WC образовалось в композиционном покрытии на рис. 3в, что совпадает с ростом вводимого в систему количества порошка карбида вольфрама от 15 до 45 г/л. Кроме того, как можно наблюдать, некоторые пики полученных композиционных соединений были широкими, что указывает на то, что они состоят из нанокристаллитов (~ 15 нм), а это может оказывать дальнейшее влияние на свойства покрытий.

Одним из важных показателей гальванических покрытий, характеризующих микрогеометрию поверхности и выравнивающую способность электролита, является шероховатость КГП, результаты измерения которых приведены на рис. 4. Эксперименты показали, что природа частиц ДФ, включенных в композицию, влияет на величину микронеровностей, а значения Ra для покрытий, содержащих WC и Al_2O_3 , сильно разнятся.

Как уже было упомянуто выше, электроосаждение железа с карбидом вольфрама весьма повышает шероховатость полученных композиционных покрытий (рис. 4а), которая варьирует с ростом концентрации частиц в покрытии.

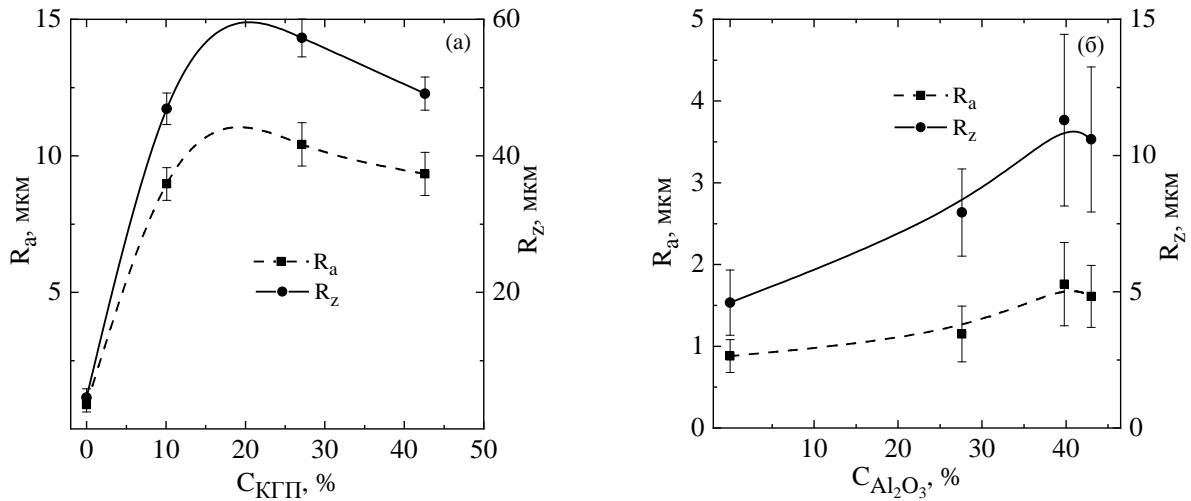


Рис. 4. Шероховатость композиционных покрытий Fe-WC (а) и Fe-Al₂O₃ (б) в зависимости от концентрации частиц ДФ в покрытии.

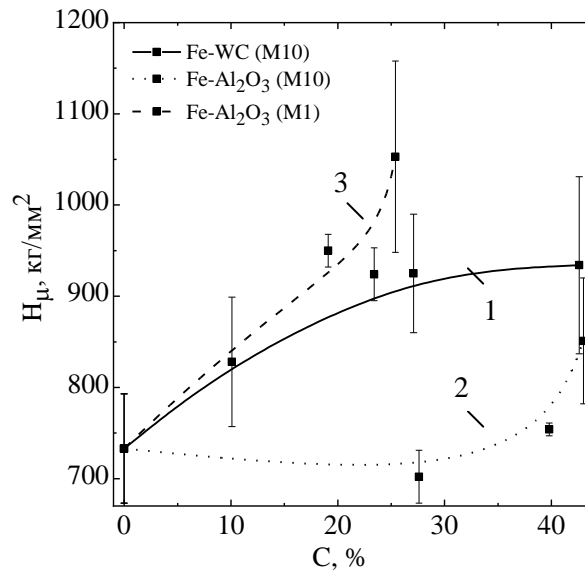


Рис. 5. Микротвердость композиционных гальванических покрытий: 1 – КГП Fe-WC с размером частиц 10 мкм; 2 – КГП Fe-Al₂O₃ с размером частиц 10 мкм; 3 – КГП Fe-Al₂O₃ с размером частиц 1 мкм.

Интересно, что частицы Al₂O₃ такого же размера (M10), как и WC, не оказывают такого сильного влияния на шероховатость и, соответственно, электроосаждение композиционных покрытий Fe-Al₂O₃ (рис. 4б).

Парадоксальные значения последних получены в абсолютно одинаковых условиях с применением частиц ДФ одного размера M10. Здесь следует заметить, что показатель шероховатости R_a для КГП Fe-WC на порядок выше, чем для КГП Fe-Al₂O₃, причем значение R_a для последнего соизмеримо с R_a для «чистых» железных покрытий. Высокое значение шероховатости для композиций Fe-WC, по-видимому, связано с тем, что вокруг частиц WC в КГП формируется структура, которая требует дополнительных исследований. При этом максимальная толщина покрытий, которая может быть получена в этих условиях для обеих композиций, предположительно будет обратно пропорциональна высоте микронеровностей. А вот с ростом

концентрации дисперсной фазы в покрытии шероховатость R_a варьирует в небольших пределах и для Fe-WC, и для Fe-Al₂O₃ (рис. 4).

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Основными показателями физико-механических свойств покрытий являются микротвердость и износостойкость. Между последними нет прямой связи, однако известно, что чем выше микротвердость, тем выше и износостойкость. Из рис. 5 видно, что концентрация карбида вольфрама в КГП влияет на микротвердость. С увеличением концентрации карбида вольфрама увеличивается микротвердость, причем при увеличении концентрации до 42,6% микротвердость увеличивается на 210 кг/мм² по сравнению с «чистым» железом. Это объясняется тем, что первые слои атомов (кристаллы) железа,

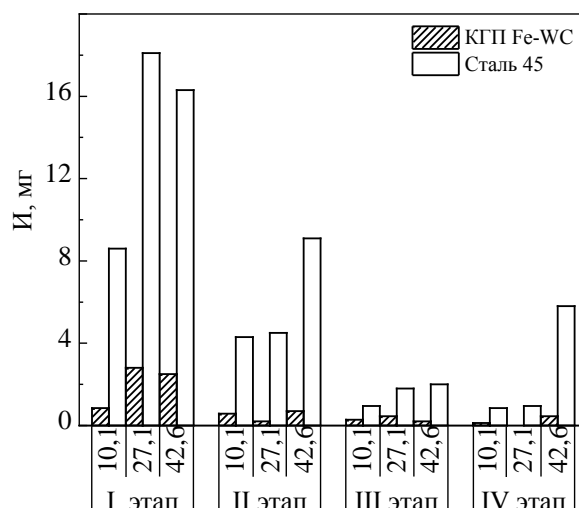


Рис. 6. График изменения износа композиционных гальванических покрытий Fe-WC, содержащих WC: 10,1; 27,1; 42,6% и контртела из стали 45 (закаленная) через каждые 2500 дв. ходов (циклов).

покрывающие частицы карбида вольфрама (или соприкасающиеся с частицами вольфрама) имеют такую же (или близкую) структуру, как и у карбида вольфрама. Подобные результаты были получены многими исследователями, изучающими структуру и прочность сцепления покрытий. Кроме того, с увеличением концентрации карбида вольфрама в композиции вероятность попадания индентора (при измерении микротвердости) в частицу WC растет. При этом, учитывая тот факт, что частицы WC имеют высокую микротвердость (9 по шкале Мооса), причем в зависимости от ориентации кристаллографических плоскостей минимальное значение составляет 1300 кг/мм^2 , а максимальное – 2200 кг/мм^2 , то это вполне объяснимо.

В отношении композиций Fe- Al_2O_3 можно отметить, что характер изменений их микротвердости по сравнению с Fe-WC несколько иной. Для покрытий Fe- Al_2O_3 с частицами дисперсной фазы M10 наблюдается некоторое уменьшение микротвердости по сравнению с ее значением для «чистых» железных покрытий (733 кг/мм^2) с последующим ростом до 851 кг/мм^2 . Для покрытий с микронными (M1) частицами из Al_2O_3 показатель микротвердости резко увеличивается до 1053 единиц, при этом включаемость белого электрокорунда в железные покрытия меньше, чем карбида вольфрама. Рост микротвердости всех материалов, в том числе и железных покрытий, приводит к повышению прочности и их износостойкости, и одно из объяснений этого явления сводится к тому, что микрочастицы тормозят движение дислокаций.

Износостойкость композиционных покрытий является наиважнейшей характеристикой, определяющей их назначение и область применения. На рис. 6 приведен колончатый график изменения износов покрытий Fe-WC (заштрихованные колонки) и контртела (пустые колонки)

из стали 45 (закаленная) по этапам. Каждый эксперимент на машине трения был разбит на четыре этапа по 2500 циклов с регистрацией значения износа каждого этапа. С целью определения возможности применения тонких покрытий без механической обработки перед испытанием на износ их не обрабатывали на шлифовальном станке, при этом испытание проводили без масла. Поэтому и зафиксирован на первом этапе для всех пар трения наибольший износ. С ростом концентрации карбида вольфрама в КПП и поведение последних в паре со сталью 45 можно характеризовать как выполняющих функцию наждака. Что касается самих покрытий Fe-WC, то при низкой концентрации WC получается одинаковый износ, как и для «чистого» железа, а вот с ростом содержания дисперсной фазы в составе КПП наблюдается незначительное увеличение износа, связанного с отделением (под действием силы трения) тех частиц WC, которые не покрыты железом или плохо закреплены (рис. 23-д).

Анализируя все четыре этапа вместе, можно сказать, что динамика изменения износов положительна (см. рис. 6). Износ для каждой трибологической пары (и для покрытий Fe-WC, и для контртела из стали 45) с переходом от одного этапа к другому уменьшается, причем наилучший результат показала пара трения с образцом, содержащим 27,1% WC. При этом следует особо подчеркнуть важный момент для состава КПП, в котором концентрация частиц не должна превышать некое значение, после которого в композиции формируется скелет из частиц дисперсной фазы, приводящий к уменьшению прочности КПП – это значение соответствует концентрации выше 30% WC [17]. На рис. 6 пара трения с образцом КПП, содержащим 42,6% WC, показывает уменьшение износа на втором и третьем этапах, а на

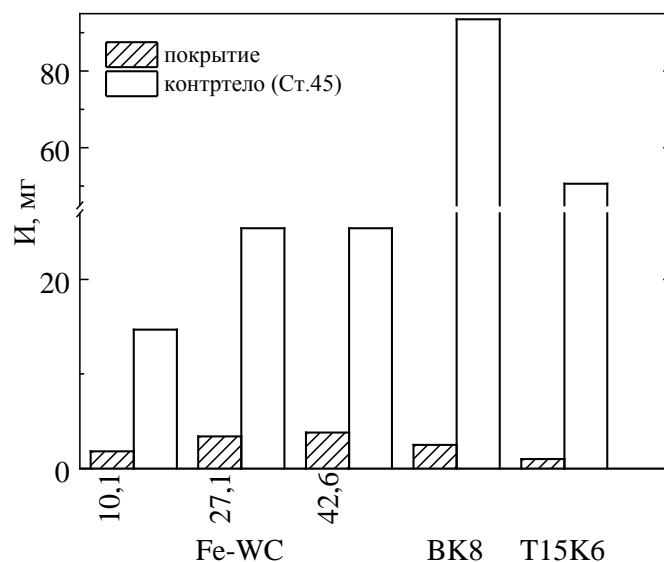


Рис. 7. Сравнительный суммарный износ (за 10 000 дв. х.) композиционных гальванических покрытий Fe-WC и покрытий, полученных электроискровым способом с электродами из сплавов BK8 и T15K6.

четвертом этапе износ больше, чем на третьем. Это свидетельствует о том, что содержание частиц ДФ в КГП превышает критическое значение.

Основным продуктом в процессе нанесения композиционных покрытий Fe-WC, значительно повышающим их физико-механические свойства, является карбид вольфрама (WC). В твердых сплавах BK8 и T15K6, которые используются в машиностроении при изготовлении режущего инструмента, применяется этот же карбид, придающий им особые свойства. Electrodes from hard alloys BK8 and T15K6 are used in electro-spark processing of materials for modification of working surfaces with the aim of increasing wear resistance and durability of parts [21–23]. Therefore, comparative tests of compositional galvanic coatings Fe-WC and coatings obtained by electro-spark method (ЭИС) with electrodes from alloys BK8 and T15K6, are of interest because the latter contain WC and are used without mechanical processing. As shown in Fig. 7, comparative wear tests of five pairs of tribology. The first three – are samples with Fe-WC compositions with WC concentration 10,1; 27,1 and 42,6, and the fourth and fifth – coatings, obtained by ЭИС with electrodes from BK8 and T15K6. Research showed that samples with Fe-WC coatings have insignificantly higher wear, than samples, modified by electrodes from BK8 and T15K6, and vice versa, control samples of the last two pairs have 2 and 3 times higher wear, than control samples of the second and third pairs. At the same time, the friction coefficient of Fe-WC coatings in pair with steel 45 is 0,24, and of coatings obtained by ЭИС, – 0,55. Friction coefficient, characterizes energy costs in the process of friction.

как известно, характеризует энергетические затраты в процессе трения.

ВЫВОДЫ

1. Максимальное содержание частиц дисперсной фазы карбида вольфрама в железных покрытиях достигает 42,6%, что позволяет осаждать на катоде композиционные гальванические покрытия Fe-WC необходимого состава.
2. Уменьшение размера частиц дисперсной фазы в композиционных гальванических покрытиях приводит к росту микротвердости, а, следовательно, к повышению их прочности и износостойкости.
3. Технологический процесс нанесения железных композиций обеспечивает возможность осаждать тонкие пленки на детали из Fe-WC и эксплуатировать их без механической обработки.
4. Сравнительные испытания композиционных гальванических покрытий Fe-WC и покрытий, полученных электроискровым способом, показали соизмеримый износ, а в целом пары трения с покрытиями Fe-WC оказались более эффективными.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Настоящая работа выполнена в рамках проекта ANCD20.8009.5007.18 «Manufacturing of new micro- and nanostructuring materials by physic chemical methods and the elaboration of their base» и частичного финансирования европейским проектом H2020 Smart electrodes (№778357).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Белевский, С.С., Данильчук, В.В., Готеляк, А.В., Лелис, М., и др., Электроосаждение Fe-W сплавов из цитратного электролита. Роль материала анода, *ЭОМ*, 2020, т. 56, № 1, с. 14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3639943>
- Дикусар, А.И., Белевский, С.С., Макроскопический размерный эффект состава и свойств покрытий сплавами металлов группы железа с вольфрамом при индуцированном соосаждении: механизм формирования и следствия, *ЭОМ*, 2023, т. 59, № 2, с. 1. <https://doi.org/10.52.577/eom.2023.59.2.01>.
- Солодкова, Л.Н., Кудрявцев, В.Н., *Электролитическое хромирование*. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. 191 с.
- Мелков, М.П., Швецов, А.Н., Мелкова, И.М., *Восстановление автомобильных деталей твердым железом*. М.: Транспорт, 1982. 200 с.
- Гологан, В.Ф., Бобанова, Ж.И., Енаки, М.А., Ивашку, С.Х., и др., Износостойкие хромовые покрытия, осажденные в тетрахроматном электролите с подключением индуктивно-емкостного устройства, *ЭОМ*, 2014, № 2, с. 10.
- Обработка поверхностей металлов и пластмасс с использованием электролитических или химических процессов*, Информационно-технический справочник ИТС-36-2017. М.: Бюро НТД, 2017. 223 с.
- Виноградов, С.С., *Промывные операции в гальваническом производстве*. М.: Глобус, 2007. 157 с.
- Шайдулин, А.М., *Повышение прочности сцепления электролитического железа с легированной сталью при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники*. Дисс. ... канд. техн. наук. Кишинев, 1990. 176 с.
- Гурьянов, Г.В., *Электроосаждение износостойких композиций*. Кишинев: Штиинца, 1985. 238 с.
- Surviliene, S., Jasulaitiene, V., Lisowska-Oleksiak, A. and Safonov, V.A., Effect of WC on electrodeposition and corrosion behaviour of chromium coatings, *J. Appl. Electrochem.*, 2005, vol. 35, p. 9. <https://doi.org/10.1007/s10800-004-1760-7>
- Guochen Zhao, Jinshang Li, Yuanfeng Huang, Liming Yang, et al., Robust Ni/WC superhydrophobic surfaces by electrodeposition, *RSC Advances*, 2017, vol. 7, p. 44896. <https://doi.org/10.1039/C7RA08535D>
- Laszczynska, A., Tylus, W. and Szczygiel I., Electrocatalytic properties for the hydrogen evolution of the electro-deposited Ni-Mo/WC composites, *Int. J. Hydrog. Energ.*, 2021, vol. 46, p. 22813.
- Данилов, Ф.И., Китык, А.А., Шайдеров, Д.А., Богданов, Д.А., и др., Электроосаждение композиционных покрытий Ni-TiO₂ с использованием электролита на основе низкотемпературного эвтектического растворителя, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 3, с. 21. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1297937>
- Проценко, В.С., Бутырина, Т.Е., Богданов, Д.А., Корний, С.А., и др., Электрохимический синтез композиционных покрытий Ni/TiO₂ из низкотемпературного эвтектического растворителя и электрокаталитические свойства осадков, *ЭОМ*, 2021, т. 57, № 6, с. 1. <https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.6.01>
- Кроитору, Д.М., *Восстановление цилиндров дизелей композиционными гальваническими покрытиями железо-карборунд в центробежном гидродинамическом поле*. Дисс. ... док. техн. наук. Кишинев, 2005. 160 с.
- Борцой, Ф.В., Кроитору, Д.М., Гурьянов, Г.В., Авторское свидетельство СССР №1447937. *Устройство для осаждения композиционных покрытий*. 30.12.88, Бюл. № 48.
- Кроитору, Д.М., Гурьянов, Г.В., Володина, Г.Ф., Салтановский, Ю.Г., Структура композиционных гальванических покрытий железо-карборунд, *ЭОМ*, 2006, т. 42, № 5, с. 4.
- Mažeika, K., Reklaitis, J., Nicolenco, A., Vainoris, M., et al., Magnetic state instability of disordered electrodeposited nanogranular Fe films, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2021, vol. 540, art. ID 168433, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168433>
- Podgornik, B., Massler, O., Kafexhiu, F. and Sedlacek, M., Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings, *Tribol. Intern.*, 2018, vol. 121, p. 333. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.055>
- Братков, И.В., Юдина, Т.Ф., Мельников, А.Г., Братков, А.В., Получение и свойства композиционных электрохимических покрытий с электрохимически диспергированным графеном на основе никелевой матрицы, *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 2020, т. 63 (8), с. 90. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206308.6221>
- Kroitoru, D.M., Silkin, S.A., Kazak, N.N., Ivashku, S.Kh., et al., Physico-mechanical and tribological properties of carbon-containing surface nanocomposites produced by electrospark alloying, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2021, vol. 57, no. 6, p. 617. <https://doi.org/10.3103/S1068375521060077>.
- Benkovskii, Yu.V., Croitoru, D.M., Petrenko, V.I., Stoichev, P.N., et al., Interrelation between the composition of steel treated by electrospark alloying and the properties of resulting composite surface, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2023, vol. 59, no. 1, p. 1. <https://doi.org/10.3103/S1068375523010039>
- Бурков, А.А., Коневцов, Л.А., Дворник, М.И., Власова, Н.М., Влияние размера зерна карбида вольфрама в анодном материале ВК8 на формирование легированного слоя стали 35, *ЭОМ*, 2021, т. 57, № 5, с. 13. <https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.5.13>

Summary

Electrodeposition of wear-resistant compositions on the surfaces of parts makes it possible to increase the reliability and durability of machines. Studies have been carried out on the process of applying Fe-WC composite galvanic coatings (CGC) from a suspension electrolyte containing 550–600 g/L $\text{FeCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and microabrasive tungsten carbide powder. A high incorporation of dispersed phase particles into the coating was obtained. The properties of Fe-WC composite coatings were studied. A relationship has been established between the

concentration of tungsten carbide particles in the electrolyte and the current efficiency of the composition as well as the WC content in the coating. Some physical and mechanical properties of CGC have been determined without their mechanical pre-treatment, in particular, microhardness and wear resistance. The roughness of Fe-WC compositions was studied in comparison with Fe- Al_2O_3 coatings.

Keywords: composite galvanic coatings, tungsten carbide, microhardness; wear resistance