

Металлокерамические покрытия из металлического стекла FeCrMoWCB_{Si}, армированного TiB₂

А. А. Бурков, М. А. Кулик*

*Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН,
г. Хабаровск, 680042, Россия
e-mail: marijka80@mail.ru

Поступила в редакцию 17.09.2025

После доработки 24.10.2025

Принята к публикации 25.10.2025

Впервые приготовлены композитные покрытия из металлического стекла на основе железа, армированного диборидом титана, методом электроискрового легирования с нелокализованным электродом, состоящим из железных гранул, порошка TiB₂ и аморфизирующегося порошка в различных соотношениях. Показано, что в структуре покрытий присутствуют частицы TiB₂, максимальная концентрация которых достигается при соотношении диборида титана к многокомпонентному порошку 1:5. Установлено, что угол смачивания покрытий, армированных TiB₂, дистиллированной водой изменялся от 80,4 до 91,4°, тогда как у аморфного покрытия без диборида титана гидрофобность была выше (95,4°). Выявлено, что армирование аморфного покрытия диборидом титана позволяет повысить его микротвердость с 10,0 до 12,5–14,65 ГПа. Показано, что армирование аморфного покрытия диборидом титана по предложенной методике не ухудшает его жаростойкости. В целом применение разработанных покрытий позволяет повысить жаростойкость изделий из стали 45 при температуре 700 °С от 13 до 20 раз.

Ключевые слова: металлокерамика, металлическое стекло, TiB₂, покрытие, электроискровое легирование, смачиваемость, коэффициент трения, твердость, износостойкость, жаростойкость

УДК 621.9.048.4

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.5.35>

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время металлические стекла на основе железа (Fe-МС) привлекают широкое внимание исследователей и инженеров благодаря своим свойствам, таким как: высокая температура кристаллизации, высокая жаростойкость, хорошая коррозионная стойкость и износостойкость, а также относительно низкая стоимость материала [1]. Одним из перспективных подходов для повышения прочности и износостойкости Fe-МС-покрытий является введение второй кристаллической фазы в аморфное покрытие. Это приводит к формированию металлокерамических покрытий с аморфной матрицей [2]. Такой подход позволяет комбинировать уникальные свойства Fe-МС с высокой твердостью и прочностью керамики. Существуют два варианта армирования металлических стекол: частичная кристаллизация металлического стекла путем отжига [3] или добавление керамических фаз на этапе подготовки шихты Fe-МС [1]. Оба подхода приводят к повышению твердости и износостойкости Fe-МС, однако первый чрезвычайно ограничен по номенклатуре армирующих фаз (Fe₂₃B₆, Cr₂₃C₆ и т.п.). В последние годы именно второй подход вызывает повышенный интерес исследователей.

Так, в качестве керамических фаз используют: оксид алюминия [1, 2, 4], нитрид титана [5, 6], карбид бора [7, 8], аморфный углерод [9], карбид вольфрама [10], дисилицид молибдена [11], диоксид циркония [4] и диоксид титана [12].

Диборид титана (TiB₂) часто рассматривают в качестве армирующего компонента композитных металлокерамических покрытий на основе железа [13, 14]. TiB₂ является керамическим материалом, широко известным своей химической стабильностью и высокой термической стойкостью [15]. Диборид титана имеет низкую стоимость и обладает такими полезными свойствами, как высокая температура плавления, твердость, прочность, износоустойчивость, химическая стойкость [16, 17]. Так, его твердость ($HV = 20,6\text{--}29,4$ ГПа) уступает только алмазу и кубическому нитриду бора [18, 19]. TiB₂ является самым инертным и твердым из всех боридов. В отличие от большинства керамик он является электро- и теплопроводным [16]. Наличие TiB₂ в композитном покрытии снижает плотность тока коррозии и увеличивает твердость, что является достоинством для инженерных применений [20]. Авторы работы [16] отмечают, что армирование композитного покрытия на основе железа частицами TiB₂ обеспечивает ему высокую износостойкость,

Таблица 1. Состав НЭ и обозначение покрытий

Обозначение покрытий	Доля гранул Св-08АА, об. %	Доля порошка TiB ₂ , об. %	Доля порошка АМП, об. %
TB0	95	0	5
TB20		1	4
TB40		2	3
TB60		3	2

сохраняя при этом прочность и вязкость разрушения. Диборид титана является наиболее важным армирующим материалом для стали, поскольку он обладает высокой твердостью и хорошими трибологическими свойствами [17]. Поэтому перспективно армировать матрицу Fe-МС частицами TiB₂ для повышения ее износостойкости. Ранее металлическое стекло на основе железа не армировали диборидом титана, однако использовали 5 масс. % добавку порошка металлического стекла на основе титана при спекании компактного TiB₂ [21].

В последнее время были предприняты попытки получения покрытий из Fe-МС, армированных керамикой методами газотермического напыления [1, 4, 8, 12], лазерной наплавки [11] и электроискрового легирования [22]. Технология электроискрового легирования (ЭИЛ) представляет собой метод нанесения покрытий на любые металлические поверхности. ЭИЛ не требует особой подготовки поверхности исходных деталей [23]. При приближении рабочего электрода к подложке в месте разряда генерируется тепловая энергия высокой плотности, вызывая мгновенное плавление материала электрода и его осаждение на поверхность подложки [24]. Конвективное и диффузионное перемешивание катодного и анодного материалов в процессе ЭИЛ обуславливает высокую адгезию покрытий к металлической подложке [25]. Скорость охлаждения материала в зоне воздействия низковольтных электрических разрядов при ЭИЛ достигает порядка 10⁶ К/с [26, 27], что подходит для осаждения Fe-МС-покрытий [28]. Преимуществами применения нелокализованного электрода (НЭ) при ЭИЛ являются возможность нанесения покрытий в автоматическом режиме и использование порошков в качестве основного компонента покрытий. В работах [22, 29] продемонстрирована возможность получения аморфных покрытий, армированных боридом и карбидом вольфрама, с использованием метода ЭИЛ с применением НЭ. В настоящей работе впервые предлагается вводить порошок диборида титана в НЭ к многокомпонентному порошку.

Цель работы – исследование влияния концентрации порошка TiB₂ в нелокализованном электроде на особенности осаждения, микро-

структуру, трибологические свойства и жаростойкость электроискровых Fe-МС-покрытий, армированных диборидом титана.

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

Покрытия осаждались на цилиндрическую подложку ($d = 12$ мм, $h = 10$ мм) из стали 45. Нелокализованный электрод представляет собой цилиндрический контейнер из стали 35, заполненный железными гранулами, аморфизирующимся многокомпонентным порошком (АМП) и диборидом титана TiB₂ в различных соотношениях (табл. 1). Эмпирически установлено, что соотношение порошка к гранулам (5:95 об.%) обеспечивает близкую к максимальной концентрацию элементов порошка в составе покрытий и стабильное возникновение разрядов. При увеличении этого соотношения частота возникновения разрядов будет снижаться вплоть до полного отсутствия электрических разрядов между электродами [30]. Многокомпонентный порошок состава Fe 6,78; Cr 19,77; Mo 9,9; W 8,12; C 21,9; B 18,88; Si 14,66 ат. % был приготовлен смешиванием порошков хрома, молибдена, карбида и дисилицида вольфрама, графита, кремния и тетраборида кремния в планетарной шаровой мельнице РМ 400 в течение 4 ч при скорости вращения 250 об/мин. Порошок диборида титана (ТУ 6-09-6333-69) состоял из частиц фракции от 10 до 17 мкм с медианой 12,97 мкм. Гранулы изготавливались путем нарезания сварочной проволоки (Св-08АА) диаметром 4±0,5 мм на цилиндры высотой 4±1 мм. Генератор силовых импульсов IMES-40 вырабатывал импульсы тока прямоугольной формы амплитудой 170 А при напряжении 30 В длительностью 100 мкс с частотой 1 кГц. В рабочий объем контейнера подавался защитный газ – аргон со скоростью 5 л·мин⁻¹. Подложка подключалась к отрицательному полюсу генератора импульсов, а контейнер – к положительному. Схема установки для получения аморфных покрытий методом ЭИЛ с применением НЭ подробно описана в нашей более ранней работе [31].

Фазовый состав порошков и покрытий исследовался с применением рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в Cu-Kα-излучении. Структура

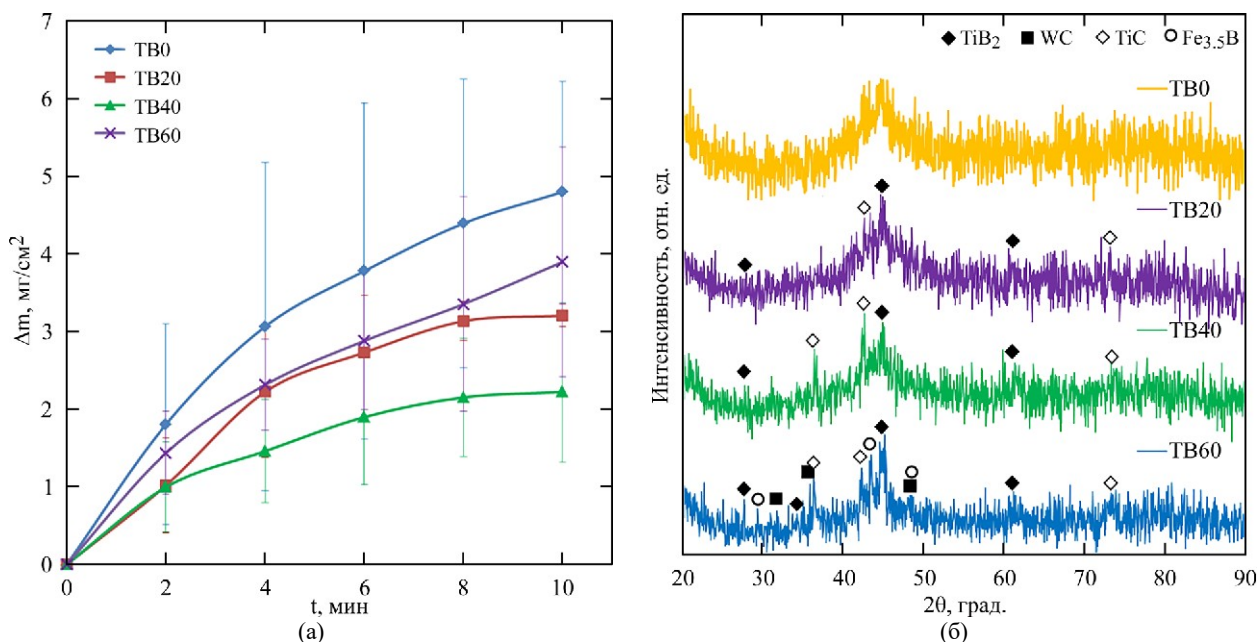


Рис. 1. Кинетика привеса подложки (а) и рентгеновские дифрактограммы (б) осажденных покрытий.

поперечных сечений покрытий изучалась с применением растрового электронного микроскопа (СЭМ) Vega 3 LMN (Tescan, Чехия), оснащенного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) INCA Energy. Шероховатость поверхности покрытий по критерию Ra была измерена на профилометре 296 (СССР). Смачиваемость поверхности покрытий дистиллированной водой измеряли методом «лежачей капли» при комнатной температуре [32]. Микротвердость поверхности образцов была определена по методу Виккерса с помощью микротвердомера ПМТЗ-М при нагрузке 1,96 Н. Выдержка под нагрузкой составляла 12 с. Для измерения микротвердости поверхность покрытия шлифовали бумагой P2500 и полировали алмазной пастой зернистостью 1 мкм.

Были проведены трибологические испытания приготовленных покрытий в режиме сухого трения на лабораторном стенде с использованием бесконтактного динамического датчика момента вращения М40-50 (Беларусь). Трибологические испытания образцов проводились по схеме «штифт на диске» [33–35] с частотой 3 об·с⁻¹ при нагрузках 25 Н в течение 10 мин. Диски ($d = 50$ мм) из быстрорежущей стали Р6М5 (60 HRC) применялись в качестве контртела. Массивы коэффициента трения были записаны в процессе испытания на износ. Для испытания на жаростойкость кубики из стали 45 с ребром 6 мм были покрыты со всех сторон. Жаростойкость исследовали в циклическом режиме при температуре 700 °С. Образцы помещались в разогретую муфельную печь ТерМИКС СНОЛ-1,4,2,5,1,2/12,5-И1, и после ~ 6–10 ч выдержки их перекладывали в

эксикатор до полного остывания, а затем взвешивали. В процессе испытания образцы находились в корундовых тиглях, чтобы избежать потери отслоившейся окалины. Общее время испытания составляло 60 ч. Изменение массы образцов фиксировали с использованием лабораторных весов с чувствительностью 0,1 мг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе электроискрового осаждения происходило отложение порошков (АМП и TiB₂) и железа из гранул Св-08АА на подложку из стали 45, что сопровождалось увеличением ее массы (рис. 1а). С ростом времени обработки скорость прироста массы подложки уменьшалась, что характерно для ЭИЛ [36]. Наибольший суммарный привес подложки за 10 мин обработки наблюдался у образца TB0, полученного без диборида титана. Это указывает на то, что порошок TiB₂ хуже возбуждает электрические разряды при ЭИЛ по сравнению с порошком АМП. Среди образцов с диборидом титана наибольший суммарный привес подложки наблюдался у покрытия TB60, а наименьший – у TB40.

Результаты рентгенофазового анализа приготовленных покрытий показаны на рис. 1б. Для всех образцов наблюдается широкое гало в интервале углов $2\theta = 35\text{--}55^\circ$, что указывает на преобладание аморфной фазы в покрытиях. У покрытия TB0 наблюдается аморфное гало без каких-либо острых брэгговских рефлексов. При добавлении в нелокализованный электрод порошка TiB₂ в рентгеновских спектрах покрытий появляются рефлексы кристаллических фаз TiB₂, TiC, WC и Fe_{3.5}B. С ростом соотношения порошков TiB₂/АМП доля

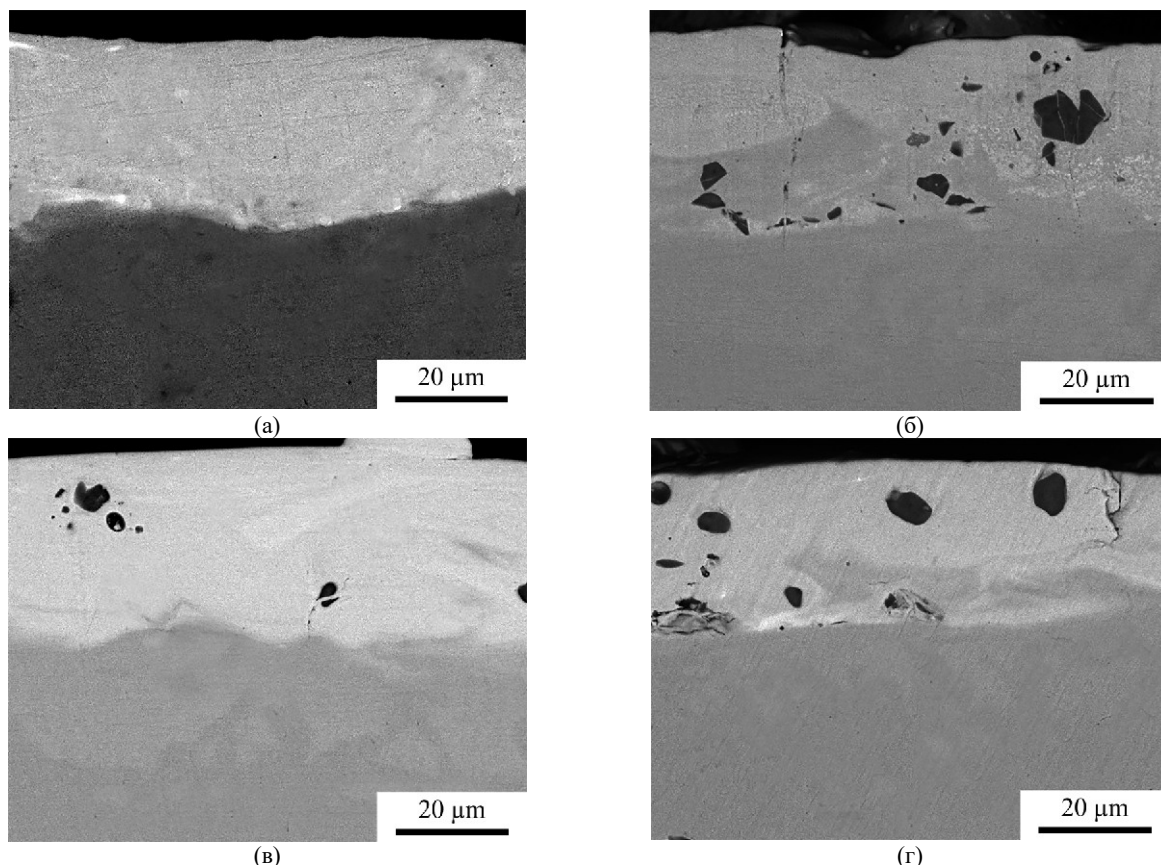


Рис. 2. СЭМ-изображения поперечного сечения покрытий: TB0 (а), TB20 (б), TB40 (в) и TB60 (г).

аморфной фазы в покрытиях снижалась. Появление карбида титана объясняется частичным растворением диборида титана в микрованне многокомпонентного расплава с последующей кристаллизацией TiC при остывании расплава после прекращения разряда. Несмотря на то что свободная энергии Гиббса для образования TiB_2 ($-57,7$ кДж/моль) ниже, чем для TiC ($-38,3$ кДж/моль), формирование TiB_2 менее вероятно по кинетическим причинам, поскольку требуется взаимодействие трех частиц, а не двух, как для TiC . Присутствие фаз карбида вольфрама и борида железа в образце TB60 указывает на ухудшение условий стеклообразования при внесении большого количества порошка TiB_2 в НЭ.

Структура поперечных сечений покрытий Fe-МС- TiB_2 показана на рис. 2а–г. Средняя толщина металлокерамических покрытий находилась в диапазоне от 37,1 до 44,2 мкм, с минимумом у образца TB40 и максимумом у TB60 (табл. 2), что согласуется с данными по привесу катода (рис. 1а). В сечении покрытий TB20, TB40 и TB60 наблюдаются темные включения, окруженные светло-серой матрицей, то есть структура покрытий соответствует металлокерамическому композиту, где роль металлической матрицы выполняет металлическое стекло на основе железа. По данным картирования, темные включения являются диборидом титана (рис. 3).

Исследование поперечных сечений показало, что наибольшая концентрация включений TiB_2 наблюдалась в покрытии TB20, а наименьшая – в TB40. В структуре покрытий наблюдаются поперечные трещины, образованию которых способствует относительно хрупкая аморфная фаза. Поры, наблюдаемые в покрытиях, являются результатом выкрашивания частиц TiB_2 в процессе подготовки шлифов, что указывает на невысокую адгезию TiB_2 к металлическому стеклу на основе железа.

Распределение элементов в поперечном сечении покрытий показано на рис. 4а–г. Их следует рассматривать с учетом того, что ЭДС-анализ недостоверно фиксировал бор и углерод, поэтому данные по ним не приведены на диаграммах. Вместе с тем соотношения концентраций металлов и кремния показаны достоверно, а величины их концентраций несколько завышены. Элементы равномерно распределены по высоте покрытия, без каких-либо флуктуаций, что говорит о гомогенности состава матрицы покрытий. Вблизи подложки концентрация железа плавно возрастает. Железо преобладало в составе всех покрытий. Его источником выступали порошок АМП, гранулы и подложка. Второе место по величине концентрации занимает хром, что соответствует составу порошка АМП. Средняя концентрация титана в матрице покрытий находилась в диапазоне от 1,6

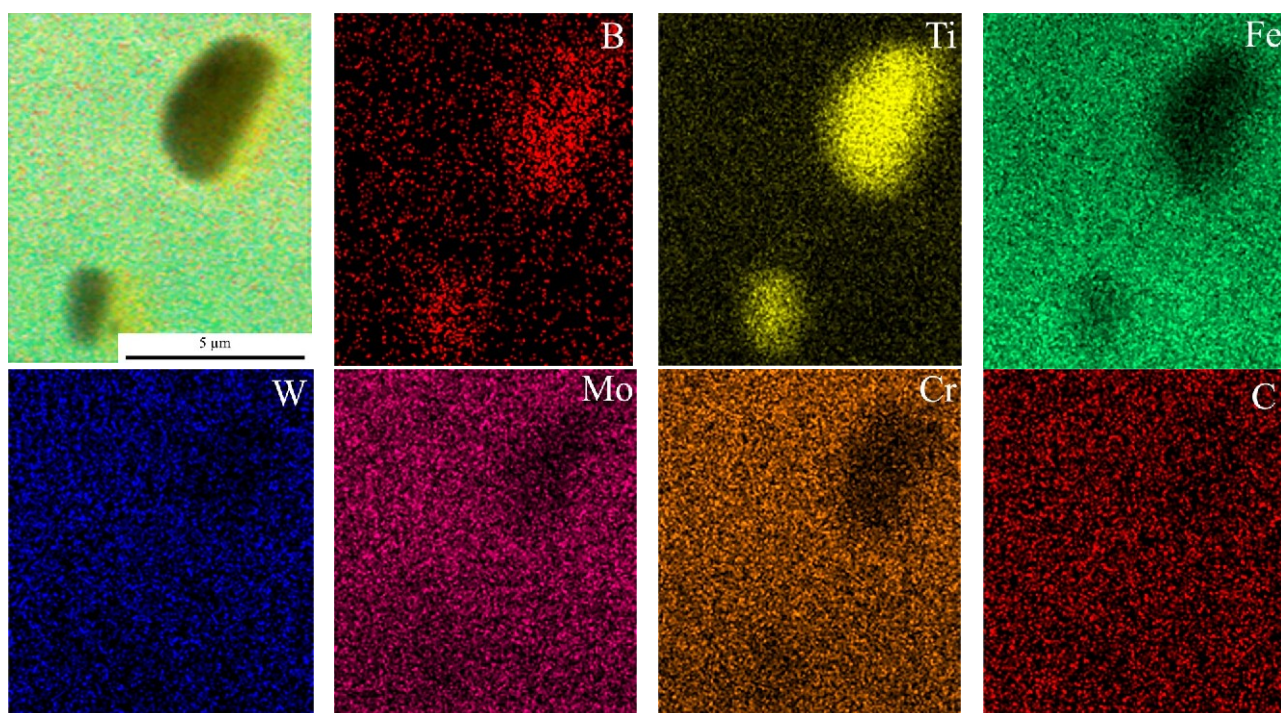


Рис. 3. Элементное картирование участка покрытия ТВ60.

до 12,3 ат.% с максимумом у образца ТВ20 и минимумом у ТВ40, что согласуется с данными о концентрации частиц TiB_2 в покрытии. Присутствие титана в матрице покрытий свидетельствует о частичном растворении порошка TiB_2 в FeCrWMoSiBC -расплаве.

Подытоживая данные по массопереносу, составу и структуре покрытий, следует указать, что частицы порошка TiB_2 снижают привес катода за счет ухудшения условий возбуждения электрических разрядов. При внесении небольших количеств диборида титана к порошку АМП частицы TiB_2 могли вовлекаться в покрытие ТВ20. При внесении больших количеств диборида титана смесь порошков АМП- TiB_2 становилась непригодной для возбуждения разрядов, поэтому они развивались в тех местах, где присутствие частиц TiB_2 минимально, то есть при непосредственном контакте гранулы с подложкой, что приводило к повышенному содержанию железа в покрытии (рис. 4д). Это ухудшало стеклообразующую способность расплава и способствовало повышенному содержанию кристаллических фаз в покрытии (рис. 1б). Таким образом, оптимальная концентрация порошка TiB_2 в смеси с АМП для достижения наибольшей концентрации частиц TiB_2 в металлокерамическом покрытии составляет 20 об%.

Шероховатость поверхности Fe-MC-TiB_2 -покрытий имела близкие значения – 8,3–8,8 мкм. Повышенная шероховатость покрытий является одним из главных недостатков технологии электроискрового легирования [37]. Смачиваемость покрытий Fe-MC-TiB_2 определялась по

углу смачивания дистиллированной водой (УСВ), который возрастал в ряду образцов ТВ20, ТВ40 и ТВ60 от 80,4 до 91,4° (рис. 5). УСВ покрытия МС был выше и составлял 95,4°. То есть с ростом концентрации TiB_2 в покрытиях наблюдалась тенденция снижения УСВ. Приготовленные покрытия характеризуются повышенной гидрофобностью из-за присутствия металлического стекла, обладающего низкой свободной поверхностной энергией [38, 39]. УСВ стали 45 составляет 47,4±4,1°. Таким образом, применение покрытий Fe-MC-TiB_2 значительно повышает гидрофобность деталей из стали 45, что призвано сократить накопление загрязнений на их поверхности.

Исследование микротвердости поверхности покрытий показало, что средние значения находились в диапазоне от 10,0 до 14,65 ГПа (табл. 2). Таким образом, внесение порошка диборида титана позволяет повысить твердость полностью аморфного покрытия ТВ0 от 24 до 46% за счет высокой твердости частиц TiB_2 . Наибольшей твердостью обладало покрытие ТВ60 из-за присутствия карбидов титана и вольфрама. В целом применение металлокерамических Fe-MC-TiB_2 -покрытий позволяет повысить твердость поверхности деталей из стали 45 от 4,1 до 4,8 раза.

Усредненные кривые массивов коэффициента трения показаны на рис. 6а. Средние значения коэффициента трения Fe-MC-TiB_2 -покрытий монотонно снижались в ряду образцов ТВ20, ТВ40, ТВ60 от 0,76 до 0,58. Сила трения аморфного покрытия ТВ0 была выше, чем у покрытий, армированных диборидом титана, что вызвано

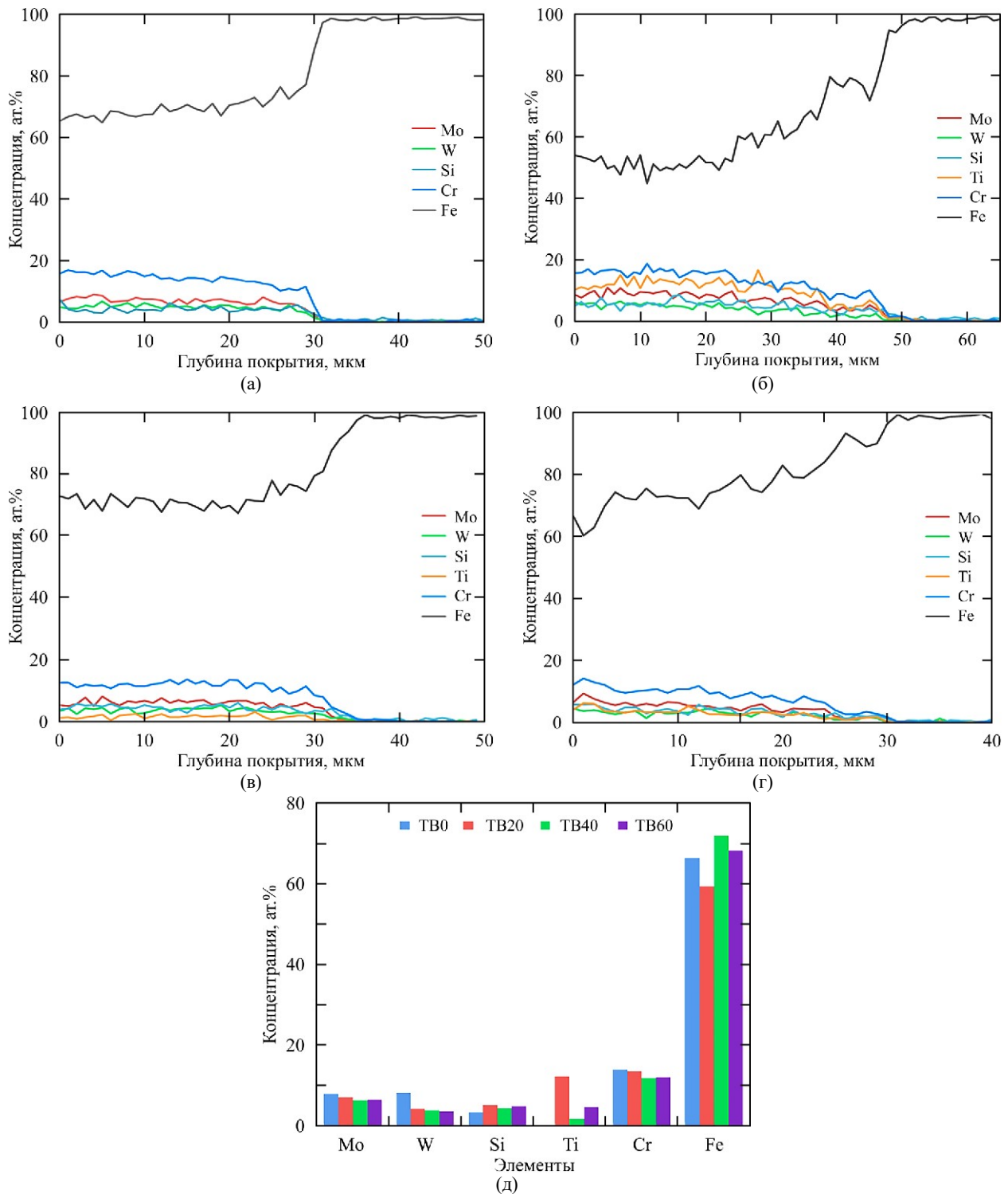


Рис. 4. Распределение элементов по высоте покрытий: TB0 (а), TB20 (б), TB40 (в), TB60 (г) и диаграмма средних значений концентраций элементов в матрице покрытий (д), согласно ЭДС-анализу.



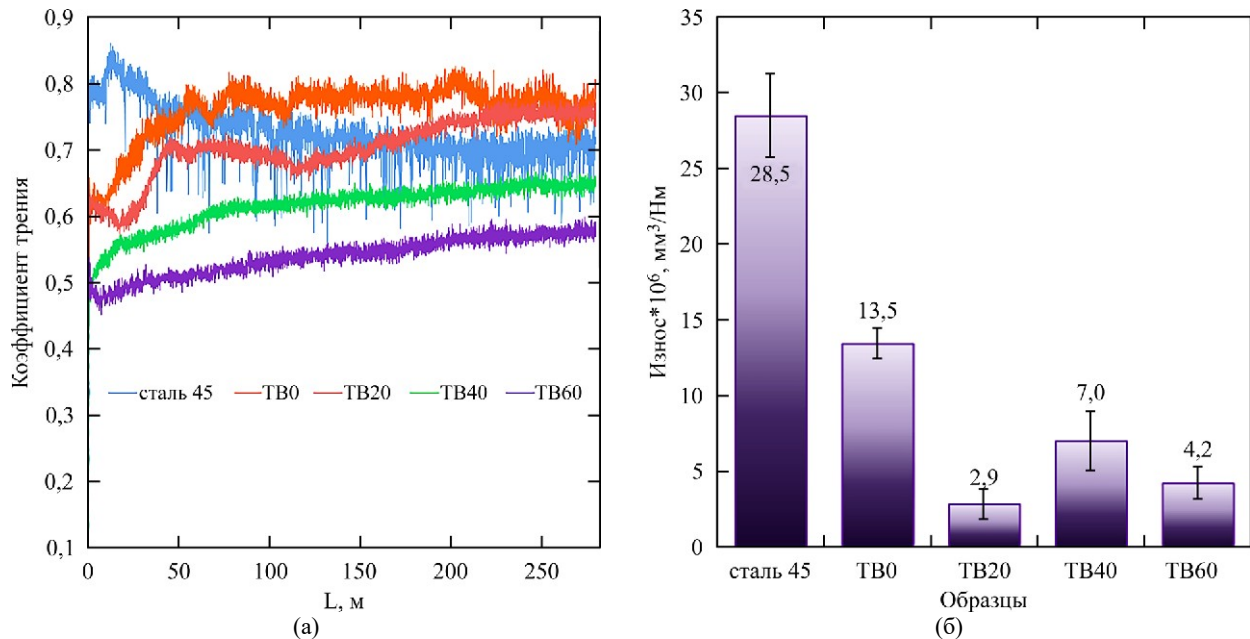
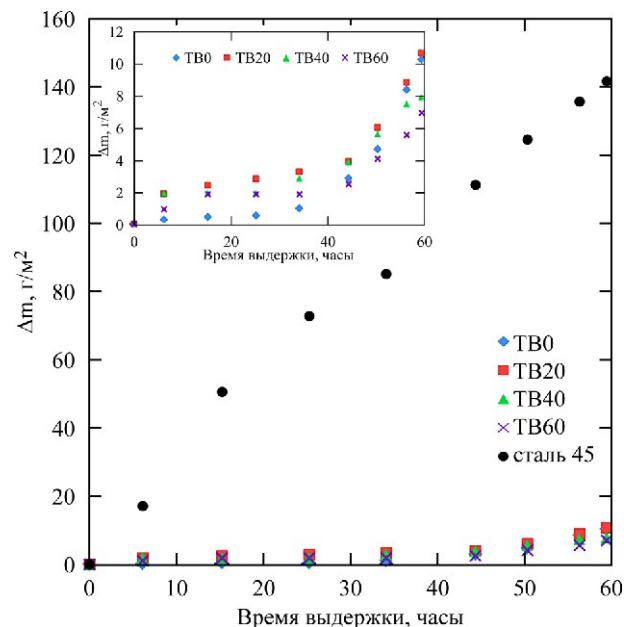
Рис. 5. УСВ покрытий Fe-MC-TiB₂.

высокой твердостью частиц TiB₂. Наименьший коэффициент трения покрытия TB60 объясняется присутствием в его составе карбида вольфрама (рис. 16).

Средние значения износа Fe-MC-TiB₂-покрытий находились в диапазоне от $2,9 \times 10^{-6}$ до $7,0 \times 10^{-6}$ мм³/Нм, как следует из рис. 66. Показано, что армирование аморфного покрытия диборидом титана приводит к значительному

Таблица 2. Толщина, шероховатость, смачиваемость и микротвердость покрытий

Параметры	Образцы			
	TB0	TB20	TB40	TB60
Средняя толщина, мкм	48±6	40±10	37±9	44±9
Шероховатость (Ra), мкм	8,3±0,8	8,6±0,5	8,8±1,0	8,6±0,8
УСВ, °	95,4±0,9	80,4±1,3	88,6±1,2	91,4±1,4
Микротвердость, ГПа	10±1,6	13,9±2,8	12,5±2,5	14,65±4,3
Микротвердость стали 45, ГПа	3±0,2			

Рис. 6. Коэффициент трения (а) и износ (б) Fe-MC-TiB₂-покрытий.Рис. 7. Изменение веса подложек из стали 45 с Fe-MC-TiB₂-покрытиями в ходе испытания на циклическую жаростойкость при температуре 700 °С.

повышению его износостойкости. Это согласуется с данными по твердости и коэффициенту трения покрытий. Наибольшей износостойкостью обладало покрытие TB20 с наибольшей концентрацией диборида титана.

Его применение позволяет сократить износ деталей из стали 45 почти в 10 раз.

Результаты тестирования на жаростойкость показаны на рис. 7. Как видно, за 60 ч высокотемпературной выдержки привес образцов с покрытиями составил от 6,9 до 10,6 г/м², тогда

как у стали 45 – 141,7 г/м². Наибольший привес наблюдался для покрытия ТВ20, тогда как лучшей жаростойкостью обладало покрытие ТВ60. Привес образца с аморфным покрытием ТВ0 составил 10,2 г/м². Из этого следует, что армирование аморфного покрытия диборидом титана по предложенной методике не ухудшает его жаростойкость. В целом применение разработанных Fe-МС-TiB₂-покрытий позволяет повысить жаростойкость изделий из стали 45 при температуре 700 °С от 13 до 20 раз.

ВЫВОДЫ

Впервые приготовлены металлокерамические покрытия из металлического стекла на основе железа, армированного диборидом титана, методом электроискрового легирования стали 45. Был использован нелокализованный электрод, состоящий из железных гранул, многокомпонентного аморфизующегося порошка и порошка диборида титана. Толщина осажденных металлокерамических покрытий составляла от 37 до 44 мкм. Показано, что в структуре покрытий присутствуют частицы TiB₂, максимальная концентрация которых достигается при соотношении диборида титана к многокомпонентному порошку 1:5. Шероховатость поверхности покрытий имела близкие значения – 8,3–8,8 мкм. Установлено, что угол смачивания стали 45 дистиллированной водой составляет 47,4±4,1°. У покрытий, армированных TiB₂, угол смачивания изменялся от 80,4 до 91,4°. Наибольшей гидрофобностью обладало аморфное покрытие без диборида титана (95,4°). Средние значения микротвердости Fe-МС-TiB₂-покрытий находились в диапазоне от 12,5 до 14,65 ГПа. Средние значения коэффициента трения Fe-МС-TiB₂-покрытий составляли от 0,76 до 0,58. Показано, что армирование аморфного покрытия диборидом титана приводит к значительному повышению его износостойкости. Наибольшей износостойкостью обладало покрытие с наибольшей концентрацией диборида титана. Его применение позволяет сократить износ деталей из стали 45 почти в 10 раз. Установлено, что армирование аморфного покрытия диборидом титана по предложенной методике не ухудшает его жаростойкость. В целом комбинирование металлического стекла с диборидом титана позволяет получить покрытие, сочетающее высокую жаростойкость с высокой износостойкостью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00399-25-04.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuchumova, I.D., Cherkasova, N.Y., Batraev, I.S., Shikalov, V.S., et al., Wear-resistant Fe-based metallic glass-Al₂O₃ composite coatings produced by detonation spraying, *J. Therm. Spray Technol.*, 2022, vol. 31, no. 4, p. 1355.
<https://doi.org/10.1007/s11666-021-01299-4>
2. Yasir, M., Zhang, C., Wang, W., Jia, Y., et al., Enhancement of impact resistance of Fe-based amorphous coating by Al₂O₃ dispersion, *Mater. Lett.*, 2016, vol. 171, p. 112.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.02.060>
3. Dong, W., Dong, M., Peng, J., Gong, W., et al., Microstructure, hardness, and wear resistance of annealed Fe-based bulk metallic glasses by spark plasma sintering, *Appl. Phys. A*, 2024, vol. 130, no. 10, p. 712.
<https://doi.org/10.1007/s00339-024-07884-y>
4. Chu, Z., Yang, Y., Chen, X., Yan, D., et al., Characterization and tribology performance of Fe-based metallic glassy composite coatings fabricated by gas multiple-tunnel plasma spraying. *Surf. Coat. Technol.*, 2016, vol. 292, p. 44.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.03.024>
5. Yugeswaran, S., Kobayashi, A., Suresh, K. and Subramanian, B., Characterization of gas tunnel type plasma sprayed TiN reinforced Fe-based metallic glass coatings, *J. Alloys Comp.*, 2013, vol. 551, p. 168.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.09.111>
6. Wu, L., Zhang, K., Zhou, Z., Wang, G., et al., Enhanced multi-scale nanomechanical deformation behavior in reactive plasma sprayed Fe-based amorphous/TiNx composite coating. *J. Alloys Comp.*, 2023, vol. 960, art. ID 171023.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171023>
7. Yoon, S., Kim, J., Kim, B.D. and Lee, C., Tribological behavior of B₄C reinforced Fe-base bulk metallic glass composite coating, *Surf. Coat. Technol.*, 2010, vol. 205, no. 7, p. 1962.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.078>
8. Movahedi, B., On the prospects of using nanoindentation and wear test to study the mechanical behavior of Fe-based metallic glass coating reinforced by B₄C nanoparticles. *Metall. Mater. Trans. A*, 2017, vol. 48, p. 1474.
<https://doi.org/10.1007/s11661-016-3928-2>
9. Wang, W., Zhang, C., Zhang, Z.W., Li, Y.C., et al., Toughening Fe-based amorphous coatings by reinforcement of amorphous carbon, *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, no. 1, p. 4084.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04504-z>
10. Terajima, T., Takeuchi, F., Nakata, K., Adachi, S., et al., Composite coating containing WC/12Co cermet

- and Fe-based metallic glass deposited by high-velocity oxygen fuel spraying, *J. Alloys Compd.*, 2010, vol. 504, p. S288.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.209>
11. Cao, S., Liang, J. and Zhou, J., Evolution in microstructure features and properties of Mo-containing Fe-Cr-Ni-B-Si composite coatings by laser cladding, *Mater. Charact.*, 2022, vol. 188, art. ID 111926.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111926>
 12. Zhang, K., Zhou, Z., Wu, L., Wang, G., et al., Microstructure and long-term corrosion resistance of plasma-sprayed FeCrMoCB metallic glass/Al₂O₃-13 wt% TiO₂ composite coatings with sandwich-like and dispersed structures, *Ceram. Int.*, 2023, vol. 49, no. 18, p. 30522.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.002>
 13. Chen, L., Yu, T., Guan, C. and Zhao, Y., Microstructure and properties of metal parts remanufactured by laser cladding TiC and TiB₂ reinforced Fe-based coatings, *Ceram. Int.*, 2022, vol. 48, no. 10, p. 14127.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.299>
 14. Sahoo, S., Jha, B.B. and Mandal, A., Powder metallurgy processed TiB₂-reinforced steel matrix composites: a review, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2021, vol. 37, no. 14, p. 1153.
<https://doi.org/10.1080/02670836.2021.1987705>
 15. Contreras, E., Galindez, Y. and Gómez, M.A., Microstructure, mechanical and tribological properties of TiBC coatings by DC magnetron sputtering onto AISI M2 steel using independent TiB₂ and graphite targets, *Surf. Coat. Technol.*, 2018, vol. 350, p. 298.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.079>
 16. Yilmaz, S.O., Ozenbas, M. and Yaz, M., Synthesis of TiB₂-reinforced iron-based composite coating, *Tribol. Int.*, 2009, vol. 42, no. 8, p. 1220.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.04.041>
 17. Kumar, S. and Das, A.K., Evaluation of mechanical properties of TiB₂-TiO₂ ceramic composite coating on AISI 1020 mild steel by TIG cladding, *Eng. Res. Expr.*, 2022, vol. 4, no. 1, art. ID 015034.
<https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac5ae7>
 18. Abyzov, A.M., Aluminum oxide and alumina ceramics (review). Part 1. Properties of Al₂O₃ and commercial production of dispersed Al₂O₃, *Refract. Industr. Cer.*, 2019, vol. 60, p. 24.
<https://doi.org/10.1007/s11148-019-00304-2>
 19. Bhattacharya, A., Parish, C.M., Koyanagi, T., Petrie, C.M., et al., Nano-scale microstructure damage by neutron irradiations in a novel Boron-11 enriched TiB₂ ultra-high temperature ceramic, *Acta Mater.*, 2019, vol. 165, p. 26.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.11.030>
 20. Guo, D., Kwok, C.T. and Chan, S.L.I., Fabrication of stainless steel 316L/TiB₂ composite coating via friction surfacing, *Surf. Coat. Technol.*, 2018, vol. 350, p. 936.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.065>
 21. Yang, C., Yao, Y., Huan, Y., Fu, Z., et al., Tough TiB₂-based ceramic composites using metallic glass powder as the sintering aid, *Adv. Eng. Mater.*, 2016, vol. 18, no. 11, p. 1936.
<https://doi.org/10.1002/adem.201600234>
 22. Бурков, А.А., Кулик, М.А., Композиционные электроискровые покрытия на основе аморфной матрицы с включениями боридов вольфрама, *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*, 2018, т. 15, № 3, с. 320.
<https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2018.03.002>
 23. Бурков, А.А., Быцур, А.Ю., Влияние качества поверхности подложек при электроискровом легировании, *ЭОМ*, 2023, т. 59, № 6, с. 18.
<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.6.18>
 24. Wang, J., Zhang, M., Dai, S. and Zhu, L., Research progress in electrospark deposition coatings on titanium alloy surfaces: A short review, *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 8, p. 1473.
<https://doi.org/10.3390/coatings13081473>
 25. Burkov, A.A., Deposition of metallic glass coatings by electrospark processing in the medium of granules of Fe₃₉Ni₈Cr₇W₇Mo₇Co₂C₁₆B₁₄ composition, *Lett. Mater.*, 2017, vol. 7, no. 3, p. 254.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-3-254-259>
 26. Li, Q.H., Yue, T.M., Guo, Z.N. and Lin, X., Microstructure and corrosion properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy coatings deposited on AISI 1045 steel by the electrospark process, *Metall. Mater. Trans. A*, 2013, vol. 44, p. 1767.
<https://doi.org/10.1007/s11661-012-1535-4>
 27. Wang, D., Wang, W., Wang, M., Li, Y., et al., Effect of operating voltage on microstructure and microhardness of NiCoCrAlYTa-Y₂O₃ composite coatings on single crystal superalloy produced by electrospark deposition, *Surf. Coat. Technol.*, 2019, vol. 358, p. 628.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.066>
 28. Бурков, А.А., Влияние энергии разрядных импульсов при электроискровом осаждении аморфных покрытий, *Физикохимия поверхности и защита материалов*, 2022, т. 58, № 5, с. 526.
<https://doi.org/10.31857/S0044185622050059>
 29. Burkov, A.A. and Kulik, M.A., Hardening of FeCrMoWCB₂Si amorphous electrospark coatings with tungsten carbide, *Lett. Mater.*, 2021, т. 11, № 3, с. 304.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-3-304-308>
 30. Бурков, А.А., Кулик, М.А., Быцур, А.Ю., Ермаков, М.А., Осаждение износостойкого Cr-Fe-Al₂O₃ покрытия на сталь 35 с использованием порошка оксида алюминия, *Трение и износ*, 2023, т. 44, № 6, с. 521.
<https://doi.org/10.32864/0202-4977-2023-44-6-521-531>
 31. Бурков, А.А., Крутикова, В.О., Быцур, А.Ю., Хе, В.К., Ti-Cr-Cu электроискровые покрытия на стали СТ3, *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2023, № 1, с. 93.
https://doi.org/10.54826/19979258_2023_1_93

32. Li, Y.C., Zhang, W.W., Wang, Y., Zhang, X.Y., et al., Effect of spray powder particle size on the bionic hydrophobic structures and corrosion performance of Fe-based amorphous metallic coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 2022, vol. 437, art. ID 128377. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128377>
33. Almond, E.A. and Gee, M.G., Results from a UK interlaboratory project on dry sliding wear, *Wear*, 1987, vol. 120, no. 1, p. 101. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(87\)90136-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(87)90136-0)
34. Kennedy, F.E., Lu, Y. and Baker, I., Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting, *Tribol. Int.*, 2015, vol. 82, p. 534. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.10.022>
35. Nataraja, M., Balakumar, G., Santhosh, N. and Naik, M.R., Characterization of wear rate of Al-12 wt% Si alloy based MMC reinforced with ZrO₂ particulates, *Mater. Res. Expr.*, 2024, vol. 11, no. 3, art. ID 036522. [doi 10.1088/2053-1591/ad3468](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad3468)
36. Кудряшов, А.Е., Замулаева, Е.И., Кирюханцев-Корнеев, Ф.В., Муканов, С.К., и др. Особенности формирования на хромовой подложке электроискровых покрытий при использовании керамических электродов ZrSi₂-MoSi₂-ZrB₂ и HfSi₂-MoSi₂-HfB₂, *ЭОМ*, 2024, т. 60, № 3, p. 1. <https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.3.01>
37. Казанников, О.В., Отмахов, Д.В., Восстановление штоков гидроцилиндров методом ЭИЛ, *Тракторы и сельхозмашины*, 2020, № 6, с. 101. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-101-107>
38. Guo, Y.Y., Xu, J.J., Zhu, L.N., Kang, J.J., et al., The wettability of metallic glasses: a review, *Surf. Sci. Technol.*, 2024, vol. 2, no. 1, art. ID 5. <https://doi.org/10.1007/s44251-024-00035-8>
39. Liang, D., Liu, X., Zhou, Y., Wei, Y., et al., Effects of annealing below glass transition temperature on the wettability and corrosion performance of Fe-based amorphous coatings, *Acta Metall. Sinica (English Letters)*, 2022, vol. 35, no. 2, p. 243. <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01228-y>

Summary

Recently, metal-ceramic composites with an amorphous matrix have attracted special attention of researchers. In this work, composite coatings made of Fe-based metallic glass reinforced with titanium diboride (TiB₂) were prepared for the first time. For this purpose, the method of electrospark deposition with a non-localized electrode consisting of iron granules, TiB₂ powder and amorphizing powder in various ratios was used. The thickness of the prepared composite coatings on 45 steel ranged from 37 to 44 μm. It was shown that the coating structure contains TiB₂ particles, the maximum concentration of which is achieved at a titanium diboride to multicomponent powder ratio of 1 to 5. The surface roughness of the coatings had close values of 8.3–8.8 μm. It was found that the wetting angle of coatings reinforced with TiB₂ with distilled water changes from 80.4 to 91.4°, whereas the hydrophobicity of the amorphous coating without TiB₂ was higher (95.4°). It was found that reinforcing the amorphous coating with TiB₂ allows increasing its microhardness from 10.0 GPa to 12.5–14.65 GPa. The average values of the friction coefficient of coatings ranged from 0.76 to 0.58. The coating with the highest concentration of titanium diboride had the highest wear resistance. Its use allows reducing the wear of parts made of steel 45 almost 10 times. It has been established, that reinforcement of the amorphous coating with TiB₂ according to the proposed method does not worsen its oxidation resistance. In general, the use of the developed coatings allows increasing the oxidation resistance of products made of steel 45 at a temperature of 700 °C from 13 to 20 times.

Keywords: metal-ceramic, metallic glass, TiB₂, coatings, electrospark deposition, wettability, coefficient of friction, hardness, wear, oxidation resistance