



УДК 621.793

Д.И. Боровик, Ф.И. Пантелеенко (Белорусский национальный технический университет, г. Минск),
А.М. Столин (Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, г. Черноголовка)
E-mail: borovikdi@gmail.com

Получение композиционных электрохимических покрытий на железной основе, упрочненных СВС-частицами с последующей лазерной обработкой*

Приведены результаты исследования структуры композиционных электрохимических покрытий, сформированных при электрохимическом осаждении из растворов-электролитов с порошковым наполнителем с последующей лазерной обработкой. Порошковым наполнителем являются композиционные частицы титан — углерод, полученные с применением метода магнетронного напыления, способные к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС). Установлено, что введение композиционного порошка титана, плакированного углеродом, в структуру электрохимического железа и последующая лазерная обработка приводят к локальному СВС на поверхности частиц и улучшению связи между упрочняющей частицей и матрицей.

Ключевые слова: композиционное электрохимическое покрытие, порошковый наполнитель, электрохимическое осаждение, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), структура, лазерная обработка, магнетронное напыление.

The results of the research of a structure of composite electrochemical coatings formed from powder-filled electrolytic solutions with the help of electrochemical deposition with successive laser surface treatment are provided. The powder filling are composite particles of titanium—carbon capable of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) obtained by magnetron sputtering. The introduction of carbon-clad composite titanium powder into the structure of electrochemical iron with successive laser surface treatment leading to a local SHS on the surface of the particles and the improvement of linkages between the reinforcing particles and the matrix is considered.

Keywords: composite coating, powder filler, electrochemical deposition, self-propagating high-temperature synthesis (SHS), structure, laser surface treatment, magnetron sputtering.

Введение

Для восстановления и упрочнения быстроизнашиваемых деталей машин широко используются технологии электрохимического осаждения металлов и сплавов. Самой производительной и дешевой в практике производства является технология электрохимического железнения. Однако получаемые гомогенные электрохимические железные покрытия не удовлетворяют все возрастающим требованиям к восстанавливаемым поверхностям по твердости, износостойкости и другим специальным свойствам, что неизбежно приводит к необходимости конструирования гетерогенных электрохимических железных покрытий. Одним из способов создания гетерогенных электрохимических железных покрытий является модифицирование структуры покрытий с помощью дисперсных порошковых керамических наполнителей [1] в целях

формирования композиционного электрохимического покрытия. Другой способ улучшения структуры электрохимических железных покрытий — термическая и химико-термическая обработка [2, 3], которая позволяет улучшить свойства поверхностного слоя железного покрытия и повысить прочность связи частица — матрица. Для повышения износостойкости покрытий применяют методику создания дискретной структуры таким образом, чтобы получалась система участков с чередующимися разнородными свойствами (твердость, плотность, состав) [4]. Но наиболее перспективным, по нашему мнению, является способ, который объединяет все названные выше подходы и заключается в лазерном модифицировании поверхности композиционных электрохимических покрытий на железной основе, содержащих кроме железной матрицы сложнoкомпонентные включения, способные к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС). Подобными включениями можно считать, например, порошок титана, на поверхность которого нанесен слой углерода методом магнетронного напыления.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-90914).

Нами было сделано предположение, что при высокоэнергетической лазерной обработке композиционного электрохимического покрытия, содержащего в своей структуре сложные двухкомпонентные частицы, представляющие собой титан, плакированный углеродом, возникает экзотермическая реакция, или так называемый самораспространяющийся высокотемпературный синтез, который приводит к образованию карбидных соединений на поверхности частицы. По нашему мнению, СВС позволит увеличить прочность связи матрица — частица и приведет к общему повышению физико-химических свойств самого покрытия.

Методика проведения исследований

Изучение влияния лазерной обработки на физико-механические свойства композиционного электрохимического покрытия (КЭП) проводили на примере КЭП на железной основе с добавлением дисперсной упрочняющей фазы. Покрытия получали из хлористого электролита-суспензии (ЭС) при механическом перемешивании и следующих режимах электролиза: температура электролита (65 ± 5) °С, плотность катодного тока 30 А/дм^2 и водородный показатель $\text{pH} = 1,0$. Покрытия толщиной $\sim 0,3 \text{ мм}$ наносили на образцы из стали Ст3 площадью $0,25 \text{ дм}^2$. Анодную обработку образцов и деталей проводили в растворе 30%-ной серной кислоты при плотности тока 60 А/дм^2 в течение 1 мин.

Дисперсная фаза представляет собой порошок титана (рис. 1) дисперсностью 1...20 мкм, на который нанесен слой углерода толщиной до 5 мкм с помощью магнетронного напыления при следующем режиме:



Рис. 1. Морфология поверхности частиц дисперсной фазы Ti + C

Материал катода	С (графит)
Ток разряда I_p , А.....	0,6
Напряжение разряда U , кВ.....	0,45
Ток катушки, А.....	0,45
Рабочее давление газа, Па	0,30
Магнитная индукция, мТл	75,0
Диаметр максимальной эрозии, мм	78
Рабочий диаметр катода, мм	110/72

Порошок дисперсной фазы Ti + C предварительно не обрабатывали, только перед внесением предварительно замачивали в небольшом количестве электролита с добавлением ПАВ, после этого проводили контроль pH и смесь постепенно добавляли в рабочий электролит. Режим перемешивания во всех опытах был постоянным.

Покрытия получали в электрохимической ванне объемом 5 л (рис. 2), оборудованной осевой лопастной мешалкой для поддержания постоянной концентрации дисперсной фазы. Фотография морфологии полученного покрытия поверхности представлена на рис. 3.

При проведении экспериментов был использован комплекс лазерной наплавки, состоящий из установки лазерной наплавки "Комета-2" и манипулятора. Схема процесса представлена на рис. 4. Режим лазерной обработки (непрерывное излучение): мощность излучения — 1 кВт; диаметр пятна нагрева 1 мм; скорость перемещения пятна нагрева — 500...2500 мм/мин; расстояние между дорожками — 1 мм.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При лазерном модифицировании поверхности КЭП происходит значительное изменение внешнего

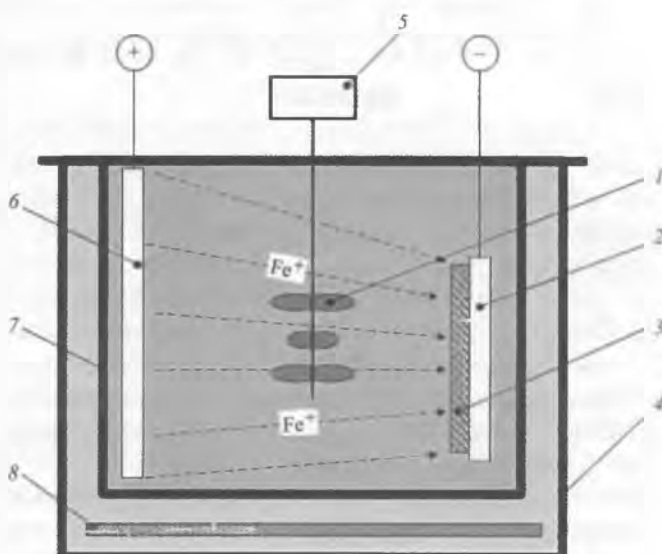


Рис. 2. Экспериментальная лабораторная установка для получения композиционных электрохимических покрытий:

1 — мешалка; 2 — катод (подложка); 3 — композиционное покрытие; 4 — водяная баня; 5 — привод мешалки; 6 — растворимый анод; 7 — корпус ванны осаждения; 8 — нагреватель

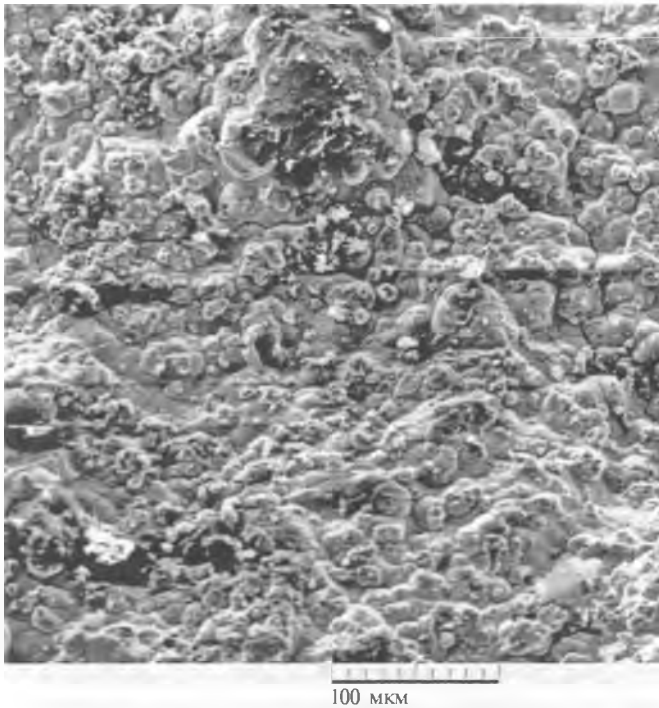


Рис. 3. Морфология поверхности КЭП Fe — (Ti + C) до лазерной обработки

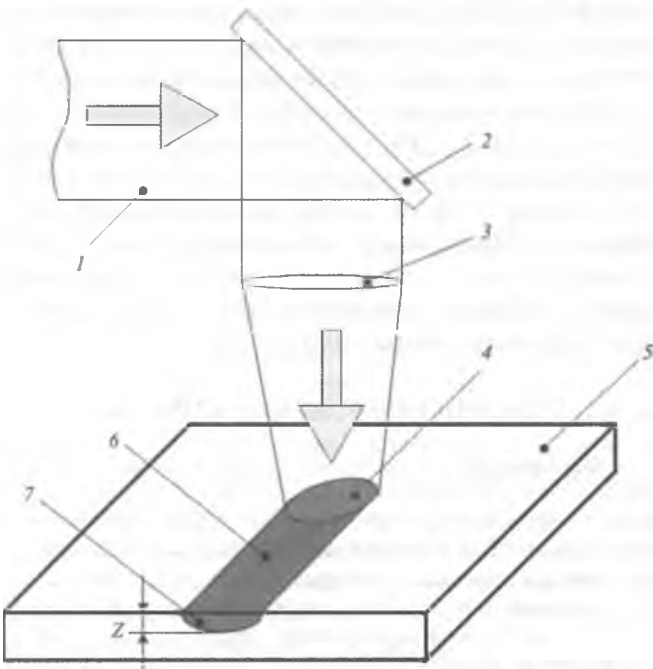


Рис. 4. Принципиальная схема лазерной обработки поверхности КЭП:

1 — лазерный пучок; 2 — управляющее зеркало; 3 — фокусирующая линза; 4 — пятно нагрева; 5 — обрабатываемая поверхность; 6 — площадь зоны обработки; 7 — поперечный вид зоны обработки; Z — глубина зоны закалки

вида покрытия, значительно увеличивается шероховатость и в эпицентре обработки образуются так называемые наплавочные валики (рис. 5). В связи с этим раз-

меры обрабатываемых деталей должны рассчитываться с учетом припуска на механическую обработку.

Микроструктура покрытия до обработки (рис. 6) — пористая, с явно различимыми частицами дисперсной фазы (рис. 7). Причина появления нежелательной пористости заключается в электропроводности самих частиц дисперсной фазы, которые по мере попадания на поверхность осаждения становятся центрами электрохимической кристаллизации, а это приводит к неравномерности покрытия по всей поверхности осаждения, и в особенности вокруг самой частицы. На фото микроструктуры покрытия после обработки (рис. 8) виден след воздействия лазерного излучения (ЛИ) на структуру композиционного покрытия. Граница области воздействия ЛИ, или так называемой зоны тер-

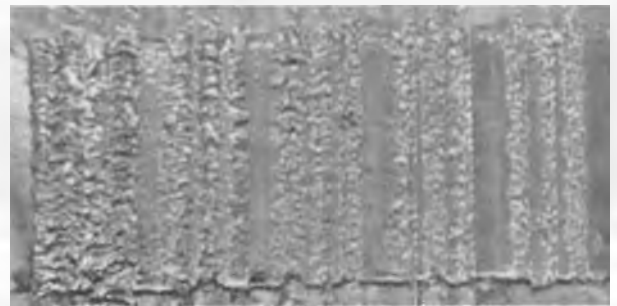


Рис. 5. Внешний вид обработанной поверхности КЭП Fe — (Ti + C) после лазерной обработки

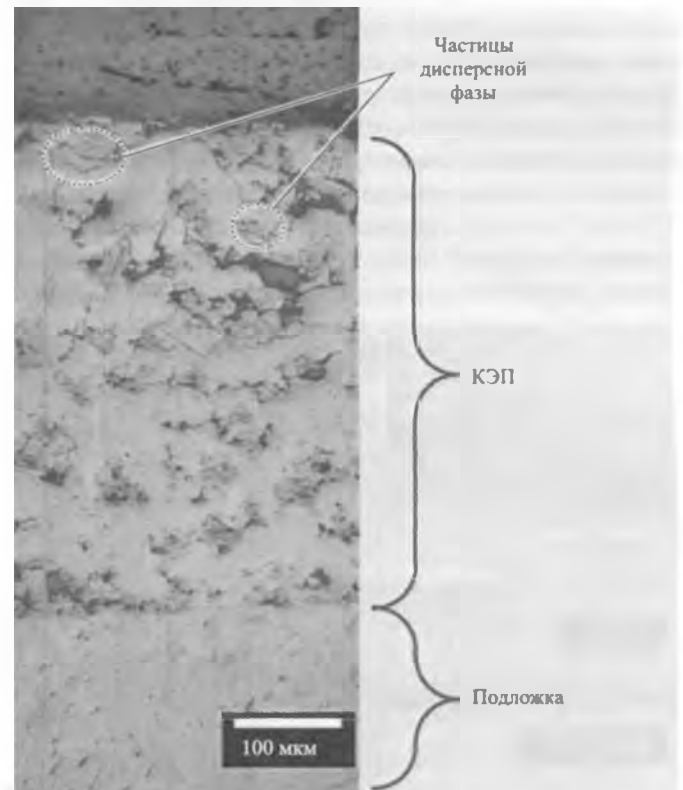


Рис. 6. Микроструктура КЭП Fe — (Ti + C) до лазерной обработки

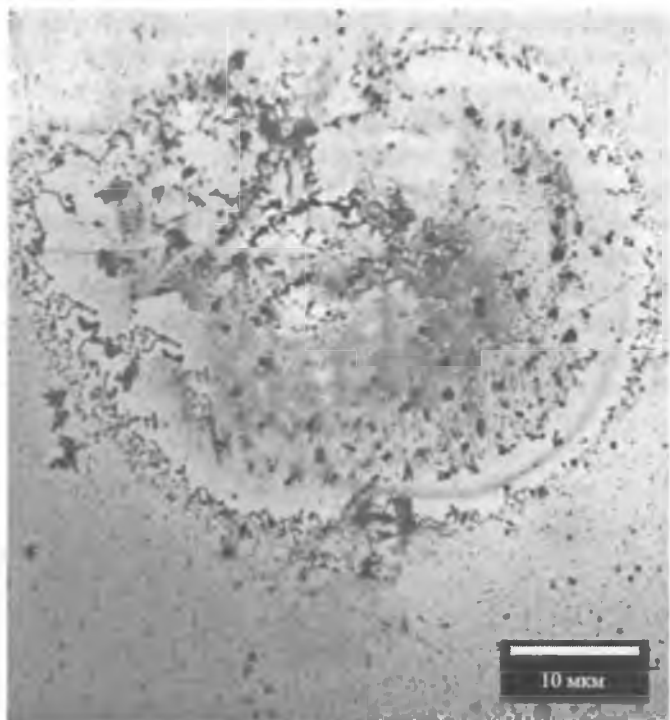


Рис. 7. Частица дисперсной фазы в КЭП Fe — (Ti + C) до лазерной обработки

мического влияния (ЗТВ), является нижней границей фазовых превращений железа при 900 °С.

Очевидно, что по мере рассеяния тепловой энергии от пятна нагрева выявляются различные по свойствам слои покрытия. В зоне пятна нагрева формируется область гетерогенного материала, в котором происходят фазовые изменения в жидком состоянии (первый слой). Затем следуют область с фазовыми и структурными превращениями в твердом состоянии (второй слой) и область с незначительным тепловым воздействием, в которой видимых изменений в структуре покрытий не происходит (третий слой). В первых двух слоях под воздействием инициирующего лазерного излучения про-



Рис. 8. Микроструктура КЭП Fe — (Ti + C) после лазерной обработки

исходит экзотермическая реакция в частицах дисперсной фазы между титановым ядром и слоем углерода на поверхности между компонентами дисперсных частиц с выделением дополнительной энергии, которая расходуется на образование устойчивой химической связи между дисперсной фазой и матрицей.

После проведения лазерной обработки КЭП Fe — (Ti + C) был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) фрагмента покрытия, который был предварительно отделен от подложки механическим путем. Из результатов РФА покрытия (рис. 9, см. с 3 обложки) следует, что под воздействием лазерного излучения в частицах дисперсной фазы действительно происходит самораспространяющийся высокотемпературный синтез с образованием карбида титана (TiC) непосредственно в покрытии.

Выводы

Лазерное излучение вызывает видимые структурные и фазовые превращения, приводящие к изменению физических свойств покрытия. Как показали предварительные исследования, средняя твердость в области обработки КЭП Fe — (Ti + C) лазерным излучением не отличается от твердости основной части покрытия и составляет ~6000 МПа (50 НВ), хотя структурные изменения должны приводить к резкому снижению твердости до 1500 МПа (100 НВ), как в случае с чистым электрохимическим железом [5], или к повышению до 10 000 МПа (100 НВ), как в случае с КЭП Fe—TiC [4]. По-видимому, на твердость повлияли как объемное количество карбида титана (менее 0,1 %), так и 1-й и 2-й слои ЗТВ, представляющие собой низколегированное титаном железо. В связи с этим необходимо проведение дополнительных исследований свойств КЭП во взаимосвязи со структурными изменениями под воздействием лазерного излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Формирование** композиционных покрытий на основе железа при электрохимическом осаждении из растворов электролитов с керамическими наполнителями / Ф.И. Пантелеенко, В.В. Саранцев, Е.Ф. Пантелеенко, Д.И. Боровик, Б.Б. Хина // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 4. С. 27—33.
2. **Кочарян Е.В.** Влияние химико-термической обработки на твердость электролитических осталеных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 12. С. 24—28.
3. **Кочарян Е.В.** Влияние химико-термической обработки на пластичность электролитических осталеных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 3.
4. **Лазерная обработка** износостойких композиционных электрохимических покрытий / Г.В. Гурьянов, С.С. Годунов, П.Е. Кисель, Ю.Е. Кисель // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 9. С. 32—37.
5. **Боровик Д.И.** Лазерная обработка электрохимического железного покрытия // Высокоэнергетические системы, процессы и их модели: Сб. научн. тр. / Редкол.: В.В. Соболев (отв. ред.), В.П. Куприн и др. Днепропетровск: Акцент/ПП, 2013. 288. С. 5—11.