

дых ученых и студентов; 22-23 апреля 2008 г. – Донецк, ДонНТУ. – 2008. – С. 91.

3. Лясоцкая, В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / В.С. Лясоцкая. – М.: Экомет, 2003. – 352 с. – Гл. 7. Термоводородная обработка сварных соединений титановых сплавов. – С. 322.

4. Гольцов, В.А. Явления, обусловленные водородом и индуцированными им фазовыми превращениями / В.А. Гольцов // Взаимодействие водорода с металлами / Отв. ред. А.П. Захаров. – М.: Наука, 1987. – 295 с. – Гл. 9. – С. 264–292.

5. Жиров, Г.И. Экспериментальное подтверждение явления термо-баро-упруго-диффузионного равновесия превращающихся фаз при гидридных превращениях / Г.И. Жиров, М.В. Гольцова // Физика металлов и металловедение. – 2002. – Т. 94, № 1. – С. 70–74.

6. Модуль упругости и нанотвердость ненаклепанного гидрида палладия / М.В. Гольцова [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии, 2015. – Т. 37. – № 8. – С. 1135–1146.

УДК 621.7

В.Г. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ),
Ю.С. УШЕРЕНКО, канд. техн. наук (ИПК и ПК БНТУ),
М.А. СУДНИКОВ (БНТУ)

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ТЕРМОДИФФУЗИОННЫХ БОРИДНЫХ СЛОЕВ НА СТАЛИ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ

Введение. В настоящее время накоплен огромный научный и практический опыт по применению термодиффузионного борирования [1, 2]. Одна из главных проблем боридных слоев, сдерживающая их активное применение – повышенная хрупкость. Исследованию хрупкости боридных слоев посвящены многочисленные работы (например, работы М.Г. Круковича [3]). Традиционными путями снижения хрупкости слоя являются: дополнительное легирование слоя, получение однофазных слоев, смягчающая термическая обра-

ботка, получение боридных эвтектик и др. Наряду с вышеперечисленными, эффективным приемом повышения работоспособности термодиффузионного боридного слоя является изменение его морфологии, получение дискретного строения с помощью различной предварительной обработки поверхности.

В настоящей работе рассматривается вариант комбинированной обработки, заключающийся в предварительном модифицировании способом электроискрового легирования (ЭИЛ) и последующем термодиффузионном борировании стальной поверхности.

ЭИЛ основано на явлении электрической эрозии и переноса электродного материала на поверхность обрабатываемой детали при протекании импульсных разрядов в газовой среде [4]. После ЭИЛ на поверхности образуются слои толщиной 10–20 мкм, которые в последующем выполняют, как правило, функцию износостойкого покрытия. Варьируя параметры электроискровой обработки (частоту и мощность импульсов), можно изменять как производительность, так и качество покрытий. Как правило, в качестве электродного материала используют материалы с высокой твердостью и износостойкостью: твердые сплавы, в основном на основе карбидов вольфрама и титана; чугун, твердые сплавы с различными связками (никель, молибден, интерметаллиды) и др. [4].

Отметим, что для случая комбинированной обработки необходимо учитывать специфику взаимодействия получаемых на разных стадиях покрытий. В контексте последующей термодиффузионной обработки формирующиеся при электроискровой обработке покрытия можно разделить на две группы: 1 – способствующие интенсификации процесса диффузии элемента, в нашем случае бора и 2 – барьерные покрытия, частично или полностью подавляющие процесс диффузии элемента вглубь изделия.

Кроме этого у ЭИЛ есть ряд преимуществ, которые по нашему мнению дают возможность, во-первых, в широких пределах варьировать структурные особенности получаемых покрытий (соотношение структурных составляющих, их распределение в слое), во-вторых, обрабатывать не всю деталь целиком, а локальные участки поверхности, которые наиболее нагруженные или на которых, например, более вероятно образование сколов диффузионного боридного слоя. В частности, такого рода обработка будет успешна и эффективна для кромок изделий при упрочнении инструмента или

оснастки, поскольку из-за краевого эффекта, проявляющегося в процессах диффузии, формируется высокая хрупкость этих зон.

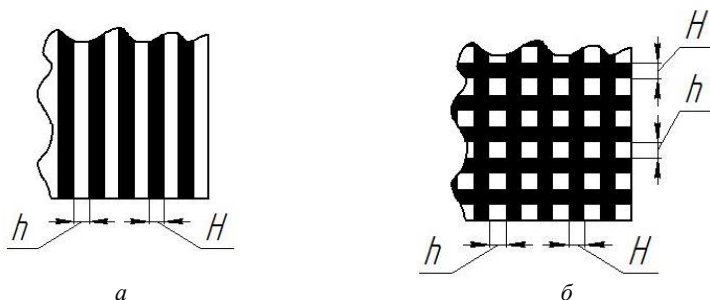
В настоящей работе представлены результаты исследований для варианта обработки, формирующего барьерные покрытия, в частности ЭИЛ медным электродом, и последующее термодиффузионное борирование. Кроме этого, необходимо отметить, что указанные возможности ЭИЛ по обработке только локальных участков поверхности дают предпосылки получения для рассматриваемой комбинации регулярных (нерегулярных) покрытий, состоящих из боридных участков, обособленных друг от друга фрагментами электроискрового покрытия. Такая электроискровая обработка экономит материал и время, а с точки зрения трибологических свойств получаемых покрытий может соответствовать сплошной поверхностной обработке.

Материалы и методика исследований. При нанесении покрытий ЭИЛ использовали установку ENPO UR-121, материал электрода – техническая медь, марки М1. Параметры обработки: сила тока $I < 0,5$ А; напряжение $U = 220$ В; частота вибрации $10-20$ с⁻¹ (турбо режим). После нанесения электроискрового покрытия проводилось термодиффузионное борирование, которое осуществлялось при печном нагреве в герметичном контейнере с плавким затвором. Режим обработки был выбран нестандартным: температура 920 °С, время 1 ч. Для проведения процесса использована шахтная электрическая печь с селитовыми нагревателями. Контроль температуры осуществляли с помощью потенциометра КСП-3П, градуировка ХА. В качестве насыщающей смеси использовали порошковую среду марки «BESTO-Vor».

Результаты исследований. Как уже отмечалось выше, специфика ЭИЛ позволяет достаточно просто формировать обработку не всей поверхности, а участков, образуя, например, периодический, регулярный профиль. Причем шаг между участками обработки может варьироваться в широких пределах, способствуя образованию различных структур покрытия.

В общем виде можно рассмотреть следующие варианты обработки по направлению формирующегося профиля: линейный (продольный, поперечный или угловой) и сетчатый («ячеистый») профили (рисунок 1). При возвратно-поступательном движении наибо-

лее благоприятным типом профиля будет продольный, расположенный по предполагаемому направлению трения.



H – ширина участка электроискровой обработки; h – шаг обработки

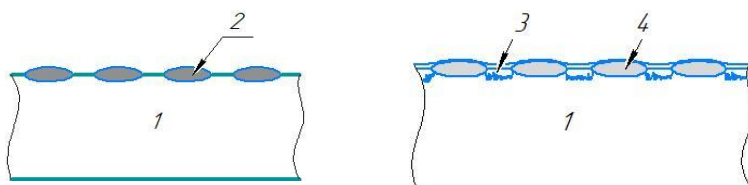
Рисунок 1 – Типы ориентации профиля (линейный (а), «сетчатый» (б))

В нашем случае был выбран профиль в виде параллельных друг другу линий, т.е. линейный, расстояние между обрабатываемыми ЭИЛ участками (шаг обработки) составил около 2 мм (рисунок 2). Варьируя шагом и режимами предварительной электроискровой обработки, создаются предпосылки управления структурой слоя.

Таким образом, описываемая обработка выполнялась по следующей схеме, представленной на рисунке 2:

1. ЭИЛ медным электродом

2. Борирование



1 – стальная основа; 2 – участок ЭИЛ медью; 3 – боридный слой; 4 – участок композиционного строения

Рисунок 2 – Схема получения покрытия при комбинации ЭИЛ и термодиффузионного борирования

Необходимо отметить, что в рассматриваемой технологии с точки зрения реализации упрочнения конкретных деталей следует учи-

тывать аспект увеличения размеров изделия. В разрезе ремонтно-восстановительных операций это является очевидным преимуществом. Известно, что при росте боридного слоя на углеродистых низколегированных сталях около 30 % его толщины растет наружу, поэтому на второй стадии, включающей термодиффузионное борирование, можно вести речь о компенсации более активно растущим боридным слоем на необработанных участках, перепада высоты профиля поверхности, который сформировался после ЭИЛ [3]. В итоге значительного перепада по высоте профиля после двух стадий обработки не наблюдается.

В результате проведенной комплексной обработки образуется структура с ярко выраженными участками классического боридного слоя и участками композиционного покрытия, сформированного за счет предварительного ЭИЛ медью (рисунок 3). Необходимо отметить, что переходная зона двух участков структуры достаточно резкая (рисунок 3, б).

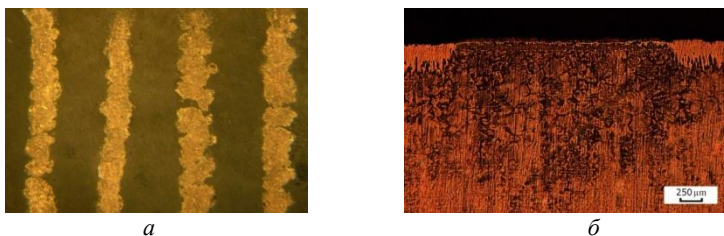


Рисунок 3 – Внешний вид (а) и микроструктура покрытия, полученного предварительным ЭИЛ медью и термодиффузионным борированием, 920 °С, 4 ч (б)

Как известно, медь препятствует сквозной диффузии бора, поскольку бор не образует соединений с медью, а растворимость бора в меди крайне низкая (0,06 % масс.) [5]. При нанесении меди электроискровым методом на поверхности происходит искрообразование и часть медного электрода переносится на поверхность, при этом медь частично перемешивается с основным металлом (железом), формируется дефектная структура, которая только частично непроницаема для атомов бора. При последующем борировании формируется специфичная слоистая структура слоя, состоящая из слоя меди на поверхности, предположительно с небольшим количе-

ством оксида меди, конгломерата боридов железа и меди, причем бориды преимущественно представлены низкобористой фазой Fe_2B , слоя сплошных боридов и твердого раствора бора и углерода в железе (рисунок 4).

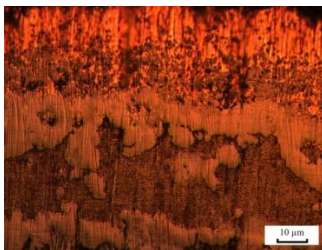


Рисунок 4 – Микроструктура участка покрытия с композиционным строением, полученного предварительным ЭИЛ медью и термодиффузионным борированием, 920 °С, 4 ч

При формировании участков боридных фаз, имеющих округлую форму и обособленных между собой фрагментами покрытия, полученного ЭИЛ, должна происходить частичная компенсация упругих деформаций в слое за счет соседних зон и, как следствие, снижение хрупкости. Т.е. при изгибающих нагрузках такое комплексное покрытие ведет себя как менее хрупкое, при изгибе разрушение покрытия происходит позже, чем при сплошном слое боридов. Кроме этого, хрупкость, определенная на участках с композиционным строением слоя, установленная по суммарному баллу хрупкости, снижается в 1,3–1,5 раза относительно слоя с традиционным двухфазным строением боридного слоя.

Необходимо отметить особенности изменения микроструктуры покрытия после различной длительности термодиффузионного борирования. При температурах 920 °С активность атомов бора очень высока, диффузионные процессы проходят по зонам дефектов сформированного ЭИЛ покрытия. При исходной толщине медного слоя порядка 30 «живучесть» такого участка сохраняется лишь для времени обработки до 1 ч, т.е. разделительным (барьерным) слой является лишь некоторое время. В дальнейшем диффузия бора способна «пробить» барьерный слой и образовать под медным слоем отдельные железобористые фазы. Таким образом, с течением вре-

мени под медным слоем образуются отдельные выделения боридной фазы округлой формы.

На участке композиционного строения, где толщина медного покрытия составляла порядка 30 мкм, толщина композиционного покрытия составила 40–45 и 50–60 мкм при выдержке 2 и 4 ч соответственно. Соотношение фаз FeB и Fe₂B на участках с традиционным строением боридного слоя приблизительно 1:1. Микротвердость боридного участка составляет 14000–15000 МПа, участка композиционного покрытия варьируется в широких пределах от 1500 до 14000 МПа. Таким образом, существует возможность в широких пределах изменять механические свойства образующегося покрытия.

Заключение. Нанесение медного покрытия способом ЭИЛ способствует разделению общего слоя при последующем борировании на участки боридного слоя и участки композиционного покрытия на основе боридов железа и меди. Причем медь в структуре представлена в виде слоя на поверхности и обособленных дисперсных включений, образующих с боридами железа конгломерат фаз. Такая структура достаточно перспективна для деталей, работающих в парах трения, в этом случае включения меди могут частично выполнять роль смазки.

На участках с композиционным покрытием, полученным предварительным ЭИЛ, диффузия бора замедляется, за счет этого преимущественно образуются низшие бориды железа, которые обладают более высокой пластичностью. В связи с появлением в структуре включений меди, у которой модуль упругости значительно меньше, чем у боридов, и активной коагуляции боридных фаз возможно некоторое снижение и релаксация внутренних напряжений в слое, что сказывается на общей хрупкости боридного слоя. Хрупкость, определенная на участках с композиционным строением слоя, снижается в 1,3–1,5 раза относительно традиционного борирования.

Установлено, что микротвердость получаемых боридных участков соответствует микротвердости слоев, полученных при классических условиях обработки, в том числе в зоне, приближающейся к переходной, и составляет 14000–15000 МПа.

Создание рассматриваемых композиционных слоев на основе бора позволяет значительно снижать хрупкость получаемых слоев и

соответственно расширять область их применения, например для условий работы с умеренными ударными нагрузками.

Список литературы

1. **Минкевич, А.Н.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.
2. **Ворошнин, Л.Г.** Борирование стали: [Текст] / Л.Г. Ворошнин, Л.С. Ляхович. – М.: Metallurgia, 1978. – 240 с.
3. **Крукович, М.Г.** Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.
4. **Электроискровое** легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич [и др.]. – Кишинев: Изд-во «Штиинца», 2086. – 196 с.
5. **Диаграммы** состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справочник / Под ред. О.А. Банных, М.Е. Дрица. – М.: Metallurgia, 1986. – 440 с.

УДК 661.8

Н.В. ЗЫК, канд. хим. наук,
И.Л. КУЛИНИЧ,
Д.О. КАПУСТА,
З.С. ДРОЗДОВИЧ (БНТУ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА СОЕДИНЕНИЙ РЗЭ ИЗ ФОСФОГИПСА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ЕГО КОМПОНЕНТОВ С АЗОТНОЙ КИСЛОТОЙ

Известно, что растворимость нитратов РЗЭ больше, чем сульфатов РЗЭ [1], следовательно, применение азотной кислоты позволит повысить их концентрацию в растворе.

С целью определения термодинамической вероятности протекания отдельных реакций, реализующихся при взаимодействии фосфогипса с азотной кислотой, выполнены термодинамические расчеты с участием соединений РЗЭ по известным данным [2–4].