

ТВЧ НАГРЕВ И СВЧ МЕТАЛЛУРГИЯ: НОВЫЙ ПОДХОД В ОБЛАСТИ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

С.Л. Силяков^{1*}, В.Ф. Аулов^{2**}, В.И. Юхвид¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, г. Черноголовка, Россия

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), г. Москва, Россия

*ssl@ism.ac.ru

**gosniti@mail.ru

К одному из простых и эффективных методов массового нанесения защитных покрытий и упрочнения поверхностных слоев стальных изделий относится индукционная наплавка. Процесс наплавки базируется на использовании ТВЧ нагрева с использованием двух основных технологических схем: диффузионного насыщения поверхностных слоев активным в химическом отношении бором и наплавкой порошкообразных эвтектических сплавов [1, 2]. В результате многофакторного прямого и опосредованного процесса воздействия электромагнитного поля на металлическую подложку, флюс, исходную шихту синтезируются биметаллические изделия, у которых формируется слой, обладающий комплексом свойств: износостойкостью, кислотоупорностью, жаростойкостью и т.д. Методика нанесения слоев характеризуется простотой осуществления и скоротечностью процесса наплавки. Использование индукционной наплавки позволяет наносить покрытия на рабочие поверхности, как новых изделий, так и многократно восстанавливать изношенные детали механизмов, обеспечивая уменьшение расхода металла для изготовления запасных частей оборудования. Существенным недостатком индукционной наплавки является небольшой выбор синтезируемых на рабочей поверхности материалов из-за узкого ассортимента недорогих эвтектических наплавочных порошков.

Первые попытки по объединению процессов электромагнитного воздействия, СВЧ и элементов химико-термической обработки с использованием СВЧ предприняты в работах [3–5]. Исследования показали, что порошковые СВЧ составы термитного типа также «прозрачны» для электромагнитного поля, как и шихтовые материалы, используемые для классической индукционной наплавки. При этом, нагрев с последующим воспламенением СВЧ составов термитного типа идет в режиме теплового взрыва за счет теплопередачи от нагреваемой ТВЧ металлической подложки.

Целью настоящей работы является исследование возможности получения твердых износостойких покрытий на стальных поверхностях при нагреве их токами

высокой частоты с применением экзотермических СВС смесей термитного типа. В машиностроении применение скоростного индукционного нагрева до температуры порядка 1180°C позволяет сократить процесс формирования покрытия Fe_2V толщиной $0,4\text{--}0,6$ мм до нескольких минут. Однако, проблема промышленного использования этого метода затруднена необходимостью замены существующих индукторов, используемых для закалки материалов ($T=800\text{--}900^{\circ}\text{C}$) на индукторы, обеспечивающие нагрев поверхности с шихтой до $T=1200^{\circ}\text{C}$. Для использования существующего оборудования необходимо разработать процесс, обеспечивающий протекание химической реакции и диффузии при температуре соответствующей закалке материалов. Это требует применения добавок в шихту, обеспечивающих экзотермическую реакцию после инициации процесса при 800°C для поднятия температуры поверхности до $T>1200^{\circ}\text{C}$. Предметом настоящих исследований является поиск шихтовых материалов и методических подходов, которые обеспечат процесс нанесения покрытий на детали машин при ТВЧ нагреве для увеличения их (деталей) износостойкости на оборудовании используемого для закалки.

В качестве исходных компонентов экзотермических СВС смесей для нанесения защитных покрытий или упрочнения поверхностных слоев стальных изделий использовали широкий круг оксидов металлов, неметаллов, восстановителей. Конечными продуктами их взаимодействия являются литые карбиды, бориды, силициды и сплавы на их основе.

Эксперименты по наплавке защитных покрытий на металлических подложках из стали 65Г осуществляли с использованием индукционной установки ВЧ40АВ с мощностью до 40 кВт и рабочей частотой генератора от 30 кГц до 80 кГц.

Для индукционной наплавки использовали плавный флюс П-0,66. Высушенные исходные компоненты экзотермических смесей тщательно смешивали. Подготовленные смеси помещали на стальные образцы из пружинно-рессорной стали 65Г размером $48\times 30\times 4$ мм поверх флюса. Вес исходных используемых составов составляла 4 г при насыпной плотности, как флюса, так и экзотермической смеси.

Химический состав синтезированных покрытий определяли рентгено-флюоресцентным методом химического анализа. Фазовый состав – методом рентгеновской дифрактометрии на установке ДРОН-3 с применением Fe K α -излучения. Для идентификации фазового состава продуктов синтеза был использован банк данных PowderDiffractionFile (PDF2). Комплексное металлографическое исследование микроструктуры и свойств защитных покрытий, выполнено на

микротвердомере «КМТ-1». Испытания с воспроизведением на них условий близких к условиям почвенного изнашивания проведены на установке ИМ-01.

Как показали эксперименты по горению СВС систем термитного типа в индукционном поле, процесс наплавки возможно осуществить в режиме высокотемпературного и низкотемпературного очагового восстановления оксидов (рис. 1а, 1б). В первом случае, после воспламенения экзотермической смеси формируется фронт горения, который распространяется по образцу.

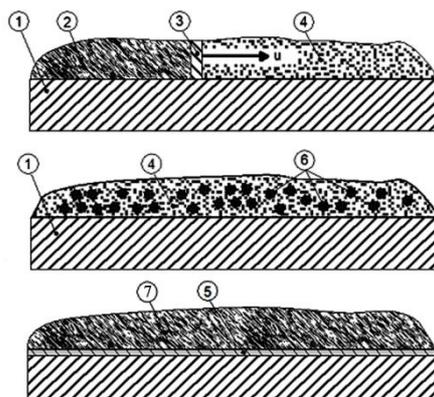


Рис. 1. Схемы синтеза твердого износостойкого защитного покрытия: а) режим высокотемпературного восстановления оксидов; б) режим низкотемпературного восстановления оксидов; в) – вид наплавки со шлаком (продукты синтеза); 1 – подложка из стали 65Г; 2 – конечные продукты синтеза; 3 – фронт горения; 4 – исходная экзотермическая СВС смесь термитного типа; 5 – синтезированный защитный твердый износостойкий слой; 6 – очаговое тление; 7 – шлак; u – скорость горения экзотермической СВС смеси термитного типа.

В этом случае, необходимым и достаточным условием синтеза защитного твердого износостойкого покрытия является воспламенение экзотермической СВС-шихты термитного типа в режиме теплового взрыва при температуре металлической подложки выше 850°C . При более низких температурах формирование покрытия не происходит. В условиях ТВЧ нагрева рабочие значения скорости горения экзотермических СВС составов термитного типа находятся в интервале $1,0\text{--}0,4\text{см/с}$. После прохождения фронта горения по исходной экзотермической смеси расположенной на поверхности металлической подложки, под действием силы тяжести синтезированный жидкий сплав в виде капель выходит из шлаковой фазы на поверхность подложки, растекается и формирует совместно с приповерхностным слоем частично расплавленной стальной подложки твердое износостойкое покрытие (рис. 1в). Особенностью низкотемпературного режима синтеза (рис. 1б) твердого износостойкого

покрытия является отсутствие процесса распространения горения в режиме волнового синтеза. В ходе синтеза на поверхности раскаленной экзотермической СВС смеси термитного типа фиксируются кратковременные локальные очаговые области горения, где интенсивность свечения значительно выше общего фона разогретой поверхности шихты. По мере прогрева шихты наблюдается преимущественное послойное распространение очагов горения от нагретой стальной подложки к верхнему слою шихты. Как при высокотемпературном, так и при низкотемпературном режиме отслоение оксидного слоя от синтезированного твердого износостойкого покрытия наступает во время закалки наплавленного образца в воду.

Примерами экзотермических СВС смесей термитного типа для нанесения покрытий могут служить следующие составы: $\text{FeO}/\text{B}_2\text{O}_3/\text{Si}$, $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{B}_2\text{O}_3/\text{Si}$, $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{NiO}/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Al}$. Синтез покрытий из этих составов осуществлен с применением методов кремнетермического низкотемпературного восстановления и алюмотермического высокотемпературного восстановления оксидов металлов. В ходе синтеза получены покрытия с толщиной наплавленного слоя 100–900 мкм. Покрытие характеризуется наличием выраженной границы раздела с основным металлом. Сама же граница раздела имеет сглаженный вид, вызванный частичным подплавлением стальной подложки посредством интенсивного нагрева токами высокой частоты и непосредственно теплом от горения экзотермической СВС смеси термитного типа.

Рентгенофазовым анализом установлено, что фазовый состав покрытия при использовании СВС смеси термитного типа $\text{FeO}/\text{B}_2\text{O}_3/\text{Si}$ формируется на базе фазы Fe_2B и железной связки. Фазовый состав твердого сплава покрытия наплавленного с применением смеси $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{B}_2\text{O}_3/\text{Si}$, состоит из двух основных фаз Fe_2B , CrB_2 и связки на основе CrFe_4 . Наиболее сложным в фазовом отношении является материал покрытия из СВС смеси $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{NiO}/\text{SiO}_2/\text{C}/\text{Al}$. Углеродосодержащие фазовые составляющие представлены фазами FeC , $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$, Cr_{23}C . Связка образована раствором хрома и титана в железе (CrFe_4 , $\text{Fe}_9\text{Ti}_{0,3}$).

Измерение микротвердости в поперечном сечении наплавов для трех СВС смесей термитного типа показали, что у наплавленных слоев она превосходит микротвердость материала подложки из стали 65Г и максимальна по мере приближения к наплавленному краю образцов. Для оценки работоспособности в условиях, близких к условиям эксплуатации изделий были проведены исследования по определению износостойкости полученных образцов наплавов из СВС смесей термитного типа. Было

показано, что предложенный способ упрочнения позволяет повысить износостойкость полученных образцов по сравнению с закаленной сталью 65Г в 2,5–3,5 раза.

Совместное применение ТВЧ нагрева и экзотермической смеси FeO/B₂O₃/Si в качестве основной составляющей наплавочной композиции обеспечивает синтез покрытия аналогичное диффузионному насыщению, используемому в классическом методе индукционной наплавки.

Существенным преимуществом в осуществлении наплавки при совместном использовании ТВЧ нагрева и экзотермической СВС смеси термитного типа имеет подход с применением высокотемпературного восстановления оксидов. В этом случае процесс наплавки осуществляется в режиме горения. Совмещение ТВЧ нагрева и режима высокотемпературного восстановления оксидов обеспечивает синтез твердых износостойких материалов на основе боридов, карбидов или карбоборидов переходных металлов с различным химическим и фазовым составами. Температура плавления этих материалов в значительной мере превышает температуру плавления подложки из стали 65Г. Таки образом, совместное использование ТВЧ нагрева и экзотермических СВС смесей термитного типа обеспечивают в значительной мере расширение сырьевой базы материалов, применяемых при синтезе твердых износостойких материалов при индукционной наплавке на штатном оборудовании.

Литература

1. В.Н. Ткачев, Б.Ч. Фиштейн, Н.В. Казинцев, Д.А. Алдырев. Индукционная наплавка твердых сплавов. Москва, Машиностроение, 1970, 183 стр.
2. В.Ф. Аулов, В.В. Иванайский, А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, В.П. Лялякин. Способ индукционной наплавки высоколегированных хромистых чугунов. Авторское свидетельство №2014105479 от 14.02.2014..
3. А.И. Трофимов, В.И. Юхвид. Эффект влияния электромагнитного поля на горение системы Ti+C. *ФГВ*, 1993, т. 29, № 1, стр. 71–73.
4. A.I. Trofimov, V.I.Yukhvid, I.P. Borovinskaya. Combustion in condensed systems in external electromagnetic fields. *Inter. J. of SHS*, 1992, vol. 1, no. 1, pp. 67–71.
5. A.I. Trofimov, V.I. Yukhvid. SHS Surfacing in an Electromagnetic Field. *Inter. J. of SHS*, 1993, vol. 2, no. 4, 1993, 343–348.