

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Ю.Н.Тюрин¹⁾, А.Д.Погребняк²⁾, О.В.Колисниченко¹⁾

¹⁾Институт Электросварки им.Е.О.Патона, НАН Украины, г. Киев, Украина,
тел: (044) 220 0914, e-mail: ytyurin@i.com.ua

²⁾Сумской институт модификации поверхности, г. Сумы, Украина

При помощи поясов Роговского определены режимы для эффективного модифицирования поверхности твердого тела. Используя оптимальные режимы, проведены исследования процессов легирования на образцах α -Fe с использованием эродированного молибденового электрода. Как показали результаты, концентрация Mo изменяется немонотонным образом, при этом наблюдается увеличение концентрации кислорода до 50 at. % в слое толщиной до 2 мкм, а концентрация углерода и азота не превышает 10 at. %. Результатом такого воздействия в поверхностном слое является формирование ОЦК (объемно центрированная кристаллическая) Fe и фазы Fe₇Mo₆, FeMo. Легирование поверхностного слоя железа молибденом и образование оксидов, карбидов увеличивает твердость образцов α -Fe в 2,5 раза, а также уменьшает износ при сухом трении.

Введение

Эффективность импульсно-плазменного воздействия на поверхность изделия обусловлена высокими скоростями нагрева и охлаждения, упруго-пластической деформацией поверхности, воздействием электрического тока и магнитного поля и, как следствие, интенсификацией практически всех известных механизмов диффузии. Наиболее интересно то, что одновременное воздействие на поверхность изделия разными видами импульсной обработки значительно увеличивает массоперенос и это увеличение носит синергетический характер [1-5].

Импульсно-плазменная технология основана на использовании высокоэнергетических потоков плазмы, которые формируются пересечными детонационными волнами. Длительность импульсов составляет до 1×10^{-3} с, частота 2 - 6 Гц, энергия импульса до 4 кДж. Скорость плазменной струи (5 - 9) км/с, температура ее $(1,5-3,0) \times 10^4$ К. По струе пропускают электрический ток 3...5 кА.

В плазму вводится металл. Воздействие высокоскоростной металлосодержащей плазменной струей, импульсным электрическим током и, как следствие, магнитным полем обеспечивает расплавление, легирование и перемешивание поверхностного слоя.

1. Исследование амплитудно-временных характеристик

Исследования проводили на импульсном плазматроне, где реализуются нестационарные детонационные режимы горения горючих газовых смесей. Энергетические параметры продуктов нестационарного детонационного горения (импульсной плазменной струи) определяются решением двумерной нестационарной задачи распространения детонационной волны в электрическом поле между двумя коаксиальными электродами.

Импульсно-плазменное устройство состоит из детонационной камеры, где осуществляется формирование горючей газовой смеси (C₃H₈, O₂, воздух) и инициирование ее сгорания в детонационном режиме; коаксиальных электродов; источника питания. При инициировании детонации, частично ионизированные продукты сгорания

поступают из детонационной камеры в межэлектродный зазор и замыкают R-L-C контур источника питания. Далее происходит разряд конденсаторной батареи. При этом происходит ускорение плазменного образования. В результате взаимодействия плазменного импульса с поверхностью изделия в зоне контакта образуется область ударносжатого плазменного слоя. Электрическая цепь между центральным электродом и поверхностью изделия замыкается.

На процесс импульсно-плазменной обработки влияет изменение количества импульсов, частоты следования импульсов, состава и расхода продуктов сгорания, емкости конденсаторной батареи, расстояния от среза сопла до изделия, а так же расстояния от торца центрального электрода до среза сопла.

Управление временем воздействия плазменного импульса и его энергетическими характеристиками осуществляется изменением емкости C конденсаторов (200...1200 мФ), напряжения U_{зар} на обкладках конденсаторной батареи (2,5...3,5 кВ), индуктивности L в цепи разряда (20...60 мГ), расстояния до поверхности изделия H (30...120 мм) и изменением размера активного пятна взаимодействия плазменной струи с поверхностью изделия (8...30 мм).

Эксперименты по замеру временного изменения электрического тока в межэлектродном зазоре, а так же тока между центральным электродом и поверхностью изделия проводили с использованием поясов Роговского по методике [5]. Пояса Роговского включали в измерительную цепь по схеме трансформатора тока. Для проведения измерений использовали две идентичные катушки с индуктивностью $2,45 \cdot 10^{-5}$ Гн. Сигналы с измерительных систем поступают на вход двухлучевого запоминающего осциллографа С8-17.

По показаниям осциллографа определяли величины тока, форму импульса, а так же его длительность, рис.2.

Индуктивность цепи разряда не изменялась и составляла ≈ 20 мкГн. При работе в диапазоне частот до 10 Гц, используемые конденсаторные батареи успевают полностью зарядиться за время между импульсами. Поэтому, при работе

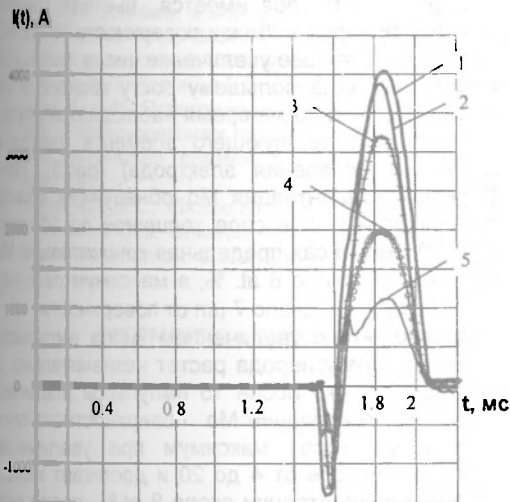


Рис.1. Временная диаграмма протекания электрического тока I (А) между торцом разрушаемого электрода и поверхностью изделия.
1- $h=20$ мм, $H=40$ мм; 2- $h=0$ мм, $H=70$ мм; 3- $h=20$ мм, $H=70$ мм; 4- $h=40$ мм, $H=70$ мм; 5- $h=20$, $H=100$ мм.

на частоте 2 Гц фактор влияния частоты на импульс тока не брался во внимание. Предварительные эксперименты показали, что изменение расхода плазмообразующих газов C_3H_8 , O_2 и воздуха в пределах: $0.24...0.48$ м³/ч, $1...2$ м³/ч, $1...2$ м³/ч, соответственно, оказывают влияние на величину тока, хотя гораздо меньшее, чем остальные факторы. При проведении замеров варьировали величинами: емкостью конденсаторной батареи— $C=600...1200$ мкФ, расстоянием от среза сопла до изделия— $H=40...100$ мм и расстоянием от торца центрального электрода до среза сопла— $h=0...40$ м. Расход газов не изменялся и составлял 0.35 м³/ч, 1.4 м³/ч, 1.3 м³/ч для C_3H_8 , O_2 и воздуха, соответственно.

Варьирование параметрами H и h приводит к изменению амплитуды тока между изделием и центральным электродом см. (рис.1), в то время, как изменение емкости приводит к изменению частоты перезарядки конденсаторной батареи. Емкость батареи также влияет на полярность изделия по отношению к центральному электроду. Так, с технологической точки зрения, обработка при $C=800$ мкФ так как изделие в данном случае является катодом а центральный электрод анодом. При этом можно ожидать более интенсивного прохождения процессов легирования поверхностных слоев составляющими плазмы. При импульсно-плазменной обработке изделий длительность импульса в широких пределах можно регулировать емкостью батареи и индуктивностью цепи разряда. В рассматриваемом случае $t_{имп} \approx 0.5$ мс. Амплитуда тока в изделие при $C=1200$ мкФ может достигать 7 кА. Плотность тока, соответственно, равна $J \approx 11$ кА/см² при диаметре пятна привязки токового канала 8 мм.

С увеличением расстояния до поверхности изделия амплитудные значения тока уменьшаются (рис.1). Но даже при расстоянии равном $70...100$ мм (характерном для технологии напы-

ления покрытий) значения тока составляют $1000...3000$ А.

Экспериментальные работы показали, что поверхность изделия испытывает в первый момент упруго-деформационное взаимодействие с ударной волной и импульсной струей плазмы, затем поверхность подвергается воздействию электрического тока. Амплитудное значение тока до 4 кА. В результате образуется импульсное магнитное поле напряженностью до 2000 Э.

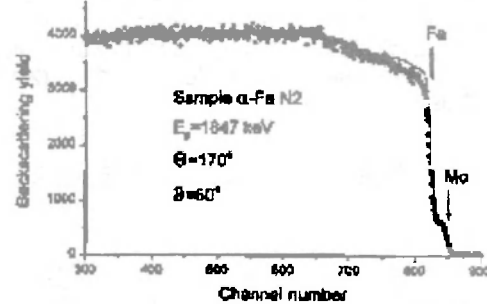


Рис. 2а

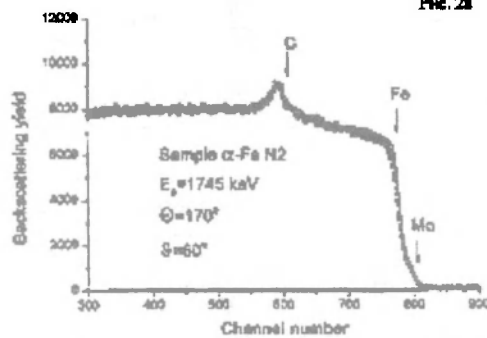


Рис. 2б

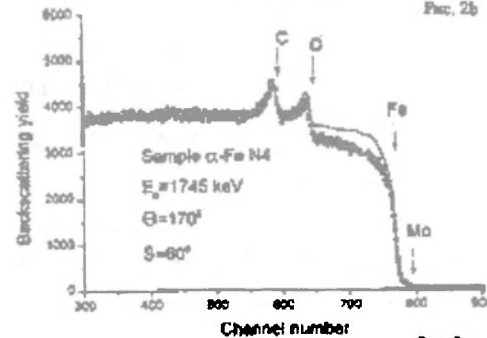


Рис. 2с

Рис.2 а). Энергетический спектр POP, полученный при использовании ^{37}Ne с энергией 1,847 MeV для образца α -Fe после импульсной плазменной обработки (число импульсов - 10); б). Энергетический спектр, полученный методом упругого резонанса протонов с $E_p=1,745$ MeV для определения концентрации углерода, азота на образце α -Fe (режим тот же); в). Энергетический спектр, полученный методом упругого резонанса протонов с $E_p=1,745$ MeV, для определения концентрации углерода, кислорода для α -Fe, обработанного импульсной плазменной струей (число импульсов-20);

Практически одновременно, на поверхность натекают продукты эрозии электрода.

II. Модифицирование и легирование

α -Fe

Для исследований процессов легирования с использованием импульсной плазмы, обработке подвергались образцы α -Fe. Параметры режимов обработки образцов приведены в табл. 1, а электрод выполнен из Mo.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что основной фазой после облучения является ОЦК - Fe (объемно центрированная кристаллическая решетка с $d = 2,866$), а также образуется фаза Fe_7Mo_6 с параметрами решетки 2,157 (2,15); 2,086 (2,08); 1,811 (1,80), и возможно образование фазы $FeMo$ 2,157 (2,14); 2,086 (2,09).

Таблица 1

Режимы обработки			
№	Материал	Кол. имп.	Емкость, мкФ
1	α -Fe	4	800
2	α -Fe	10	800
3	α -Fe	15	800
4	α -Fe	20	800

На рис.2 (а, b, c) представлены энергетические спектры резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов (а), полученные для α -Fe, после воздействия плазменной струи, и спектр упругого резонанса на протонах в районе 1745 KeV (b, c), полученный для этого же образца. На спектре мы видим границу (кинетического фактора) Fe и для Mo, пик которого находится с правой стороны, образование небольшой полочки свидетельствует о том, что вблизи поверхности в слое толщиной около 300 нм образуется соединение с таким составом как $FeMo_2$. Кроме того, на спектре, полученном с помощью резонанса на протонах, четко виден пик углерода.

На рис.2 с приведен также спектр упруго-

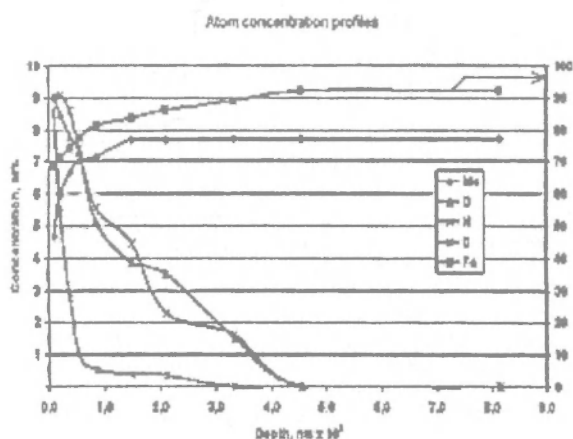


Рис. 3 Концентрационные профили, полученные из энергетических спектров элементов Mo, Fe; O; C; N в образце α -Fe, обработанном импульсной плазменной струей (10 импульсов).

го резонанса на протонах для образца Fe, обработанного большим числом импульсов. Мы видим наряду с ростом концентраций углерода и азота в

поверхностном слое имеется высокая концентрация кислорода вблизи поверхности (около 40 ат. %). Дальнейшее увеличение числа импульсов приводит к еще большему росту кислорода на поверхности. В то же время наблюдается другая картина для легирующего элемента (продукта эрозии и испарения электрода) (рис.3). Наибольшая концентрация Mo обнаружена вблизи поверхности (т.е. в слое толщиной до 10 мкм). При 10 импульсах предельная концентрация Mo составляет около 8 ат. %, а максимум расположен на глубине около 7 мкм от поверхности.

Показано, что с увеличением числа импульсов концентрация углерода растет незначительно, а кислорода - уже после 15 импульсов достигает 40 ат. %. Легирование Mo поверхностного слоя происходит через максимум при увеличении числа импульсов от 4 до 20 и достигает максимальной концентрации около 8 ат.% после воздействия 10 импульсов на поверхность α -Fe высокоскоростной импульсной струей.

Анализируя структуру поперечного шлифа образца α -Fe, можно обратить внимание на то, что область оплавления поля после воздействия 10 импульсами плазменной струи достигает 50 мкм.

Измерения твердости, проведенные по поверхности модифицированного слоя α -Fe (20 импульсов), показали увеличение твердости в отдельных участках 750 ± 40 кг/мм², в тоже время измерение твердости по поперечному шлифу показало увеличенное значение твердости 250 ± 27 кг/мм² на глубине свыше 70 мкм, при твердости исходного образца 90 ± 12 кг/мм². Среднее значение твердости, усредненное по глубине модифицированного слоя, примерно в 2,5 раза выше, чем в исходном состоянии.

Заключение

Наличие токового разряда между электродом плазменного генератора и обрабатываемой деталью обуславливает механизмы конвективного, лучистого и электронной теплопередачи.

Проведенные измерения показали, что на величину тока влияют емкость конденсаторной батареи, расстояние от среза сопла до изделия, расстояние от торца центрального электрода до среза сопла. Тогда как расход плазмообразующих газов не оказывает значительного влияния на величину тока.

Длительность импульса при неизменной индуктивности зависит только от емкости конденсаторной батареи. Емкость батареи влияет на полярность изделия по отношению к центральному электроду плазменного генератора. При $C=800$ мкФ изделие-катод, а при $C=1000$ мкФ изделие-анод. Для улучшения условий легирования целесообразно проводить ПДО при емкостях батареи, когда изделие является катодом.

Список литературы

1. Валяев А.Н., Прогребняк А.Д., Кишимото Н., Ладышев В.С. Модификация свойств материалов и синтез тонких пленок при облучении интенсивны-

ми, электронными и ионными пучками. Казахстан, Усть-Каменогорск, Восточно-Казахстанский технический университет, 2000, 345 с.

1. Якушин В.Л., Калинин Б.А., Польский В.И., Стрижнев Д.В. и др. Поверхностное легирование металлов с использованием потоков высокотемпературной импульсной плазмы. *Металлы*. № 6, 1994, стр 74-81.
2. Герцикен Д.С., Костюченко В.Г., Тишкевич В.М., Фальченко В.М. Влияние пластической деформации в импульсном магнитном поле на миграцию

атомов в металлах. // Док. НАН Украины. -1997 г. - № 3. Стр. 37-39.

4. Losko D.V., Milman Yu.V., Yefimov N.A., Korzhova N.P., Tyurin Yu.N. Physical Nature of Hardening of Steel U8 by Plasma-Detonation Working // *VOX* - 1999. - №6. - С. 764-771.1.
5. Воробьев В.С. Динамика нагрева и испарения проводника импульсным током большой плотности. *ЖТФ*. Том 66, № 1. 1996. Стр. 35-48.

INTENSIFICATION OF INTERACTION BETWEEN PLASMA AND SURFACE BY USING ELECTRIC CURRENT

Yu.N.Tyurin¹⁾, A.D.Pogrebnyak²⁾, O.V.Kolisnichenko¹⁾

¹⁾Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine

²⁾Sumy Institute of Surface Modification, Sumi

tel: (044) 220 0914, e-mail: ytyurin@i.com.ua

Developed technologies provide transfer of the electric energy to the surface of a workpiece through the conducting recoverable layer. These are the technologies of plasma-detonation modification (PDM).

In the case of the PDM technology the detonation wave propagates between two coaxial electrodes. In the presence of electric field E, the electric current flows through the gaseous layer, following the detonation wave. Then a second factor, i.e., Joulean heat, joins the detonation wave. Consumable electrodes used here allow the vapours of various metals to be introduced into the jet. PDM is applied for heat treatment of surfaces, their alloying, as well as for coating deposition.

The pulse-plasma surface modifying of a piece is carried out by the combined thermodynamic action of a plasma jet and electromagnetic field. Thus the shock-compressed layer of alloying elements is formed from ionic and atomic plasma components on a surface of a piece. It is possible to change structure of a superficial layer by changing structure of plasma. Using of hydrocarbon plasma provides formation oversaturated solution of carbon in a layer of metal.

Researches of pulse-plasma alloying is carried out by using RBS method. α -Fe samples were used. Thickness of alloying layer by Mo make up more then 10 mkm.

The pulse-plasma treatment of piece is high-efficiency process of surface alloying. Supply of components of a combustible mix in pulse plasma generator is carried out continuously. This simplifies technology of hardening and technological devices.