

МАССОПЕРЕНОС И ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКЕ

ТОПАЛА П.А.

Бэлцкий государственный университет им. А.Руссо,
Балти, Молдова

В работе представлены результаты исследования процессов массопереноса и диффузии при электроискровой обработке материалов. Перенос материала на поверхность обработки осуществляется в виде паровой, жидкой и твердых фаз. В зависимости от режима обработки возможно образование слоев за счет переноса материала и его перемешивания с жидкой фазой подложки или же за счет процессов диффузии возможна химико-термическая обработка поверхности детали.

The paper is devoted to the study of quantity transference and diffusion during electrical and sparking processing of materials. Material transference on the processed surface is performed in the form of steamy, liquid and solid phases. Depending on the processing regime the formation of layer is possible due to material transference and its mixture with the liquid phase of the target or diffusion processes may lead to chemical and thermal processing of the surface of the spare part.

Известно, что электроискровые покрытия нашли свое применение при упрочнении и восстановлении размеров деталей машин и аппаратов из-за своих уникальных в своем роде свойств и возможностей: позволяет проводить локальную обработку в строго указанных местах не защищая при этом поверхность детали, не требует специальной подготовки поверхности, не нагревает деталь в процессе формирования слоя, обеспечивает высокую сцепляемость нанесенного материала с подложкой, дает возможность использовать широкую гамму материалов для нанесения покрытий и т.п. [2, 4]. Несмотря на свои достоинства на сегодняшний день мало изучены диффузионные процессы сопровождающие данный способ обработки и их влияние на свойства сформированных слоев и их влияние на структуру и глубину подслоев.

Одним из основных факторов определяющих процесс насыщения поверхности катода легирующими элементами является массоперенос и как его следствие происходят изменения физико-химического характера которые могут определить способ обработки поверхности (формирование поверхностных слоев переносом материала анода или порошкового материала вводимого в межэлектродный промежуток, термическая или химико-термическая обработка поверхности в отсутствии процесса переноса материала анода, а только насыщения элементами рабочей среды или изменения структуры поверхностного слоя материала детали за

счет термического воздействия плазмы импульсного электрического разряда). Детальный анализ этих явлений позволит оценить влияние различных параметров импульсного воздействия на характер и глубину массопереноса, величину концентрации элементов в различных зонах поверхностного слоя и возможности управления этими явлениями. Ранее процесс массопереноса при воздействии импульсных разрядов изучался при контактном ЭИЛ [1,2] и при единичных разрядах, осуществляемых на установке типа «Разряд» [3] или ей подобной [4]. В первом случае наблюдался ускоренный массоперенос элементов в твердой фазе на значительную глубину – десятки микрометров, во втором – эта величина не превышала нескольких микрометров, что не представляет практической ценности для методов упрочнения.

В реальных условиях ЭИЛП обычно происходит многократное воздействие разрядов на один и тот же участок поверхности, поэтому при наших исследованиях был выбран вариант непрерывной обработки образцов, обеспечивающий многократное воздействие разрядов. По методике, описанной в работе [1] было проведено изучение массопереноса элементов (радиоактивного Fe^{55} , Fe^{59}) в поверхностных слоях стальных (сталь 3, сталь 4Г) и титановых (ВТ1-0) образцов, подвергнутых воздействию импульсных разрядов на установке типа «Разряд-2М». Удельное время обработки $t = 0,5$ мин/см² обеспечивало прохождение 75...250 разрядов в одной и той же зоне катода.

Исследование влияния многократности импульсного воздействия при лазерном облучении и ультразвуковом воздействии на массоперенос в твердой фазе показало, что глубина проникновения и распределения элементов в фиксированных точках существенно увеличиваются с ростом числа воздействий. Сравнительные результаты массопереноса, полученные в наших экспериментах (рис. 1, 2), с данными при воздействии единичных импульсных разрядов [1] надо отметить аналогичную тенденцию в изменениях глубины массопереноса и концентрации элементов по глубине. Так, при единичных разрядах в воздухе и в среде аммиака глубина проникновения азота в твердой фазе за период действия импульсного разряда не превышает 2-7 мкм, подобная глубина массопереноса наблюдается при воздействии на Fe, Ti, Al единичных импульсов на установке «Разряд-М» [3] (при параметрах разряда, соответствующих нашему эксперименту). В нашем случае многократное воздействие разрядов увеличивает глубину массопереноса в 3-5 и более раз (см. рис. 1, 2) и данные [6]. В этом случае характерная глубина массопереноса может составлять 10-40 мкм. Подобная величина отмечена и при воздействии

ультразвукового облучения, когда суммарное количество ударов по образцу за один цикл нагружения составляло $10^4 - 10^5$.

В условиях нашего эксперимента практически во всех случаях после воздействия разряда максимум концентрации радиоактивного элемента наблюдается на некоторой глубине от обрабатываемой поверхности, т.е. концентрационные кривые (рис. 1) имеют экстремум и подобны таковым, получаемым при контактном ЭИЛ и лазерном воздействии. Такой ход концентрационных кривых характерен для воздействия импульсных источников энергии, приводящих к возникновению в обрабатываемой зоне жидкой фазы. Для контактного ЭИЛ – это жидкая фаза наносимого материала и основы, для лазерного луча и импульсного разряда в нашем эксперименте – это жидкая фаза обрабатываемой подложки.

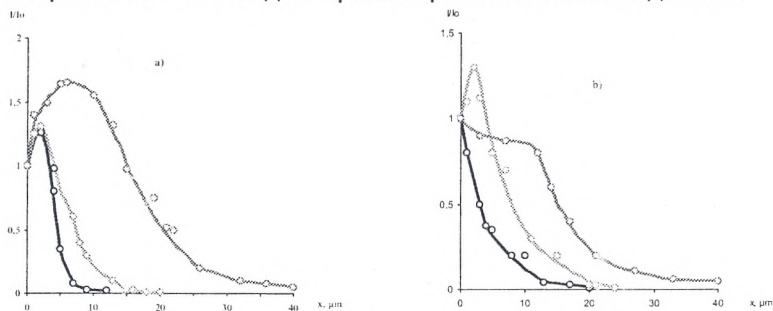


Рис.1. Распределение изотопа $Fe^{55,59}$ в поверхностных слоях образцов из стали 45 (а) и титана ВТ 1-0 (б) после многократного воздействия импульсных разрядов $U_c = 240 \text{ V}$ și $S = 2 \text{ mm}$ (1), $S = 1 \text{ mm}$ (2), $S = 0,5 \text{ mm}$ (3)

В процессе импульсного воздействия и возникновения жидкой фазы на поверхности твердого тела происходит конвективное перемешивание жидкости и конвективный перенос элементов почти на всю глубину сформированного жидкого слоя [1], что и уменьшает концентрацию исследуемого элемента в самой верхней зоне. Отсутствие жидкой фазы в зоне импульсного воздействия обычно не приводит к появлению перегиба («горба») на начальном участке концентрационных кривых. Например, при ультразвуковом воздействии кривая распределения элементов не имеет экстремума. Подобный же характер концентрационных кривых, полученных в работах [2] для единичных импульсных разрядов, где жидкая фаза практически всегда присутствует, связан с методическими особенностями исследования массопереноса при его оценке в твердой фазе верхний закристаллизовавшийся слой жидкой фазы предварительно сошлифовывался, что по мнению авторов обеспечивало получение достоверных данных о массопереносе

только в твердой фазе. Следует отметить, что механическое шлифование не всегда позволяет точно зафиксировать границу зон жидкой и твердой фаз и может внести ошибку в результаты исследований.

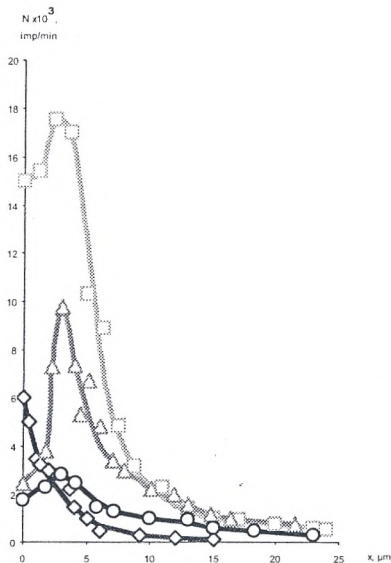


Рис.2. Распределение изотопа $Fe^{55,59}$ в поверхностных слоях образцов из стали 3 после многократного воздействия импульсных разрядов $S = 0,5$ мм U_c (V) 160(1), 240 (2), 320 (3), 400 (4)

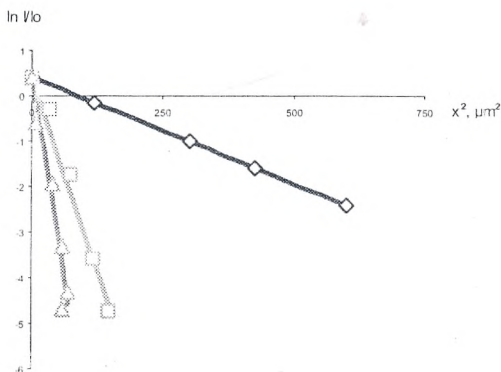


Рис.3. Концентрационные кривые изотопа $Fe^{55,59}$ в твердой фазе катода из стали 45 в координатах $(\ln \frac{I}{I_0}, x^2)$, для: $S = 2$ мм; $W = 5,57$ J (1); $S = 1$ мм; $W = 4,9$ J (2); $S = 0,5$ мм; $W = 4,3$ J (3)

Анализ концентрационных кривых, полученных при постоянной энергии разряда, выявил существенное влияние величины межэлектродного промежутка (МЭП) на массоперенос как в стали, так и в титане (рис. 1). Это в первую очередь связано с влиянием величины МЭП на особенности взаимодействия

(электроэрозионное, термическое) плазмы импульсного разряда с поверхностью обрабатываемых материалов.

Электронно-микроскопические исследования показали, что при величине промежутка $l_n = 2$ мм на поверхности катода наблюдаются мелкие электроэрозионные лунки глубиной 1-2 мкм, которые и являются зоной возможного появления паровой и жидкой фазы при возникновении пятен первого типа. Только в этой зоне возможно конвективное перемешивание элементов, что и проявляется в перегибе кривой 1 (рис. 2) на глубине 2-3 мкм. На начальном участке аналогичен и ход кривой 2 (рис. 1б), полученной при $l_n = 1$ мм. Но при этой величине МЭП появляются пятна второго типа, возникает очаг жидкой фазы, уменьшается общая площадь воздействия плазмы разряда на электрод (увеличивается плотность теплового потока Q), что изменяет глубину массопереноса и распределение элементов по глубине. Когда в зоне воздействия разряда преобладают пятна второго типа и жидкая фаза занимает практически всю площадь этой зоны интенсивность перемешивания, глубина массопереноса и концентрация элементов по глубине резко возрастают, что и отражает кривая 3 (рис. 1), полученная при $l_n = 0,5$ мкм. Левая часть графика 3 (рис. 1б) по своей протяженности превосходит величину зоны перемешивания, достигающей величины 20-25 мкм. Поэтому можно считать, что с этой глубины перенос вещества происходит в твердой фазе. Этот участок кривой и «хвосты» на кривых 1 и 2 имеют вид прямых в осях $\ln(I/I_0) - x^2$ (рис. 3), свидетельствующие об одинаковом механизме массопереноса в твердой фазе во всех трех случаях. Некоторое отличие графиков рис. 1б, полученных при воздействии разряда на титан, связано в первую очередь с особенностями его электрической эрозии при ЭИЛ [4]. При $l_n = 2$ мм, когда существуют только пятна первого типа надо учитывать «взрывной» характер эрозии в зоне контакта мигрирующих каналов с поверхностью титана и его активную реакцию с кислородом и азотом воздуха при высоких температурах. То небольшое количество паров и жидкости, которое возникает в процессе эрозии, взаимодействует с окружающей средой, образуя окислы и нитриды, поэтому, естественно ожидать отсутствие на концентрационных кривых перегиба (кривая 1, рис. 1б). Некоторое постоянство концентрации элементов на участке слоя 0...12-15 мкм при МЭП $l_n = 0,5$ мм (кривая 3, рис. 1б), объясняется выбросом из зоны разряда частиц жидкой фазы и опять же интенсивным образованием окислов и нитридов в верхней зоне жидкой ванны, препятствующих конвективному перемешиванию.

Увеличение энергии разряда при постоянной величине МЭП, например, при $I_n = 0,5-0,7$ мм, не вызывает однозначного роста массопереноса и концентрации элементов по глубине (рис. 2), подобно тому, как это наблюдается при контактном ЭИЛ [1]. В последнем случае наличие контакта электродов, возникающего в процессе разряда, затрудняет миграцию канала разряда и выброс жидкой фазы из зоны взаимодействия плазмы разряда с поверхностью катода, обеспечивая почти постоянное действие теплового источника в период прохождения импульса тока и формирования наносимого слоя, величина которого (Q) зависит от энергии разряда. В первом же случае, т. е. при бесконтактном ЭИЛ, наличие относительно большого МЭП создает условия для интенсивного расширения канала разряда, выброса жидкой фазы, возникающей на аноде и катоде, за пределы зоны взаимодействия плазмы разряда с поверхностью катода, неустойчивости теплового источника и, следовательно, изменения процесса массопереноса вещества в глубь электрода. Рост энергии разряда увеличивает количество выброшенного вещества с катода [4], что снижает концентрацию элементов в верхней части слоя (см. начальные участки кривых рис. 2), где идут процессы конвективного перемешивания, оставляя практически неизменным массоперенос в твердой фазе. При минимальной энергии разряда концентрационная кривая 1 (рис. 2) отражает в основном массоперенос в твердой фазе, что вероятно связано с незначительным количеством жидкой фазы, возникающей при разряде, и ее выбросом за пределы зоны разряда.

Помимо широкого спектра физических процессов, развивающихся на поверхности электродов в зависимости от величины МЭП и энергии разряда и существенно влияющих на массоперенос элементов, следует отметить роль теплового источника, создаваемого разрядом в процессах массопереноса. Ранее теоретически было показано [1], что при воздействии импульсных разрядов одним из важных факторов, которые определяют интенсивность массопереноса в твердой фазе, является плотность теплового потока.

Если, используя данные [2], сопоставить плотности тепловых потоков при обработке стали на МЭП $I_n = 2$ мм; 1 мм и 0,5 мм (в нашем случае при постоянной энергии разряда плотность теплового потока при различных значениях определяется площадью взаимодействия плазмы разряда с поверхностью катода) с глубиной массопереноса, то эти соотношения соответственно равны 1; 1,4; 2,2 и 1; 1,54; 3. Из этих данных видно, что с уменьшением I_n и

ростом плотности теплового потока глубина массопереноса почти пропорциональна последнему.

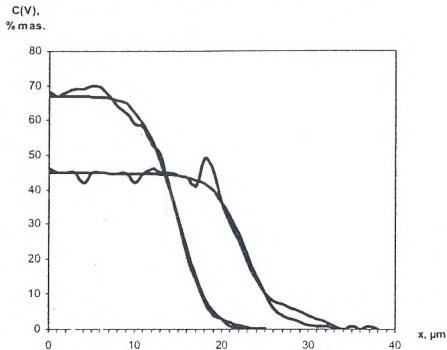


Рис.4. Кривые распределения ванадия по глубине сформированного слоя при электроискровом легировании на поверхности образца изготовленного из тантала: 1 - экспериментальный режим I; 2 - экспериментальный режим II; 3 - расчетный режим I; 4 - расчетный режим II. $C_0(I)$, $C_0(II)$ - концентрация ванадия в области перемешивания; $h_{II}(I)$, $h_{II}(II)$ - толщина области перемешивания; $h_D(I)$, $h_D(II)$ - толщина диффузионной зоны в режиме I и II соответственно.

Концентрационные профили тантала не показаны [5]

Исследования, проведенные авторами работы [5,6,7,8], показали, что слои, сформированные с применением импульсных разрядов, состоят из двух отличимых зон по количеству содержащихся в них легирующих элементов: первая зона равномерного распределения перемешивания легирующих элементов и вторая диффузионная зона (рис. 5). В первой зоне происходят сложные металлургические процессы, связанные с испарением, плавлением и перемешиванием жидких фаз материала легирования и матрицы под воздействием канала разряда, в то же время тепловые явления в материале подложки способствуют развитию диффузионных процессов на большую глубину легирующих элементов в твердом состоянии.

Проведя анализ экспериментальных кривых (рис. 1, 2, 3), полученных авторами работы [5], и зависимость $\ln(I/I_0) = f(h^2)$ можно записать:

$$\ln(I/I_0) = a - kh^2$$

$$h = \sqrt{\frac{a - \ln \frac{I}{I_0}}{k}}$$

в которых a - является глубиной расплава, k - коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала и режима обработки.

Известно, что коэффициент диффузии D в металлах при импульсных воздействиях с концентрированными потоками энергии

в несколько раз выше, чем при обычной изотермической обработке. Таким образом, при импульсном воздействии на металлы коэффициент диффузии может достигать $10^{-7} \dots 10^{-2}$ см²/с [5,6]. При обработке металлов методом плазменной детонации коэффициент диффузии легких элементов (азот, кислород, углерод) достигает $10^{-5} \dots 10^{-4}$ см²/с [5]. Это явление может быть объяснено индукцией неуравновешенных вакансий, деформацией и появлением зон оплавления на поверхностях обработки.

Одной из основных задач для определения коэффициента диффузии при электроискровой обработке являлось определение времени, в котором протекает сам процесс диффузии, поскольку кривые распределения элементов в обработанных слоях представляют собой интегральные результаты многократного воздействия импульсных разрядов, сопровождающихся с циклическим изменением температуры. Каждый цикл обработки протекает в два этапа: высокотемпературный при взаимодействии с плазмой и низкотемпературный в периоде между двумя последующими разрядами.

Таким образом, эффективный коэффициент диффузии $D_{эф}$ в условиях электроискровой обработки может быть определен из условия [5]:

$$D_{эф} = N(D_1 t_1 + D_2 t_2),$$

в котором: N – номер циклов обработки; D_1 и D_2 – соответственно коэффициенты диффузии в процессе разряда и в паузе между разрядами; t_1 и t_2 представляют длительность разряда и паузы.

Количество циклов обработки соответствуют числу разрядов, которому подвергся обработанный участок поверхности. Если учесть, что каждый разряд оставляет на обработанной поверхности след в форме круга с диаметром $d_{з.т.в.}$, а обработанная общая поверхность представляет квадрат со стороной a , тогда площадь ее поверхности составит $A_д = a^2$, тогда для поверхности с площадью A_0 , для которой определяется концентрация элементов ($A_0 = \pi d_0^2/4$). Исходя из того, что при электроискровой обработке $A_д > A_0$, количество циклов обработки будет определяться уравнением:

$$N = (A_д / A_0) f t,$$

в которой f является частотой следования импульсов разряда; а t – время обработки поверхности образца.

Выводы

Таким образом, многократное воздействие импульсных разрядов, протекающих в режиме недонапряжения и применяющихся для электроискрового нанесения порошковых

материалов, при прочих равных условиях, приводит к существенному (в 3-5 раз) увеличению глубины массопереноса в твердой фазе и концентрации элементов по глубине по сравнению с воздействием единичных импульсов. В этих условиях воздействия глубина массопереноса может достигнуть десятков мкм, что позволяет надеяться на возможность формирования данным методом поверхностных слоев на инструменте и деталях машин с определенными физико-химическими свойствами, обеспечивающими их высокие эксплуатационные характеристики.

При используемых параметрах разряда за счет варьирования величиной МЭП возможно осуществление и изучение процессов массопереноса при условиях чисто термического воздействия импульсных разрядов практически без оплавления зоны обработки или при условиях образования жидкой фазы в зоне воздействия плазмы разряда с поверхностью электродов, подобно тому, как это наблюдается при лазерном, импульсно-дуговом и других методах обработки.

Литература

1. Душенко В.Ф., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В. О возможном механизме диффузий при электроискровом легировании и других видах импульсного воздействия на металлы. Электронная обработка материалов, 1980, №3, стр. 36...39.
2. Ревуцкий В.М., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Фаличенко В.М., Душенко В.Ф. Исследование распределения элементов в электроискровых покрытиях с помощью радиоактивных изотопов. Электронная обработка материалов, 1981, №6, стр.32...35.
3. Гитлевич А.Е., Топала П.А., Мазанко В.Ф., Фаличенко В.М., Томашевский Н.А., Носовский О.И. Массоперенос в поверхностных слоях стали и титана при многократном воздействии импульсных разрядов. ЕОМ, 1989, №6, рр. 21...23.
- 4.73. Гитлевич А.Е., Тспала П.А., Снегирев В.А., Игнатьков Д.А. Особенности электрической эрозии электродов при импульсных разрядах, протекающих в режиме недонапряжения. Электронная обработка материалов. 1988, №3, стр. 9...12.
5. Пячин С.А., Завадинский В.Г., Гниденко А.А., Чебирик Ю.А. Оценка коэффициентов взаимной диффузии переходных металлов при электроискровом легировании тантала. Физика и химия обработки материалов, 2004, №3, стр. 59...65.
6. Погребняк А.Д., Кузьментьева О.П., Кшнякин В.С., Тюрин Ю.Н. Колесниченко О.В. Упрочнение и массоперенос при импульсной плазменно-детонационной обработке. Физика и химия обработки материалов, 2002, №2, стр. 40...48.
7. Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Коваленко С.В. Поверхностная обработка титанового сплава электроискровым легированием. Перспективные материалы, 2002, №3, стр.13...19.
8. Неможкаленко В.В., Топала П.А., Томашевский Н.А., Мазанко В.Ф., Носовский О.И. Особенности формирования поверхностных слоев при искровых разрядах, Металлофизика, 1990, Т.12, №3, стр.132...133.