

Массоперенос в поверхностных слоях стали и титана
при многократном воздействии импульсных разрядов*г. Кишинев*

При воздействии импульсных разрядов на подложку (катод) в процессе электроискрового легирования (ЭИЛ) наблюдается ускоренный массоперенос элементов в твердой фазе [1—3]. Это явление отмечается как при инициировании разрядов за счет контакта электродов, т. е. при контактном ЭИЛ [1, 2], так и при импульсных разрядах, когда межэлектродный промежуток (МЭП) составляет сотни и более микрометров и его пробой достигается за счет подачи на электроды вспомогательного поджигающего импульса при режиме недонапряжения или основного импульса с напряжением равного или более пробивного для используемого МЭП [3, 4] — бесконтактный вариант ЭИЛ.

Во втором варианте массоперенос изучался только при воздействии на катод единичных импульсных разрядов при постоянной величине МЭП (варьировались величины энергии и длительности импульсного разряда [3]). В реальных условиях использования бесконтактного процесса ЭИЛ обычно осуществляется многократное воздействие импульсных разрядов, при этом в зависимости от задач ЭИЛ величина МЭП может изменяться в широком диапазоне [5]. Поэтому данные о массопереносе при многократном воздействии импульсных разрядов важны для практических целей, а также для уточнения механизма этого явления, протекающего в различных условиях воздействия импульсных разрядов.

По методике [2] было проведено изучение массопереноса в поверхностных слоях стальных (сталь 3,

сталь 45) и титановых (BT1-0) образцов, подвергнутых многократному воздействию импульсных разрядов на установке типа «Разряд-2М», применяемой для электроискрового нанесения порошковых материалов. Обработку образцов проводили в режиме упрочнения [5], когда в МЭП не подается порошковый материал. Напряжение на рабочей емкости $C=600$ мкФ изменялось в пределах 160—400 В, а величина межэлектродного промежутка — в диапазоне 0,5—2 мм. Частота импульсных разрядов была фиксированной и составляла 50 Гц. Время обработки (t) 1 см² поверхности образца — 0,5 мин. Выбранное удельное время $t=0,5$ мин/см² позволяло обработать равномерно всю поверхность без пропусков, перегрева образца и явных следов окисления поверхностного слоя. При $t>0,5$ мин/см² ухудшались качественные характеристики обработанной поверхности, при $t<0,5$ мин/см² отмечались пропуски и неравномерность сформированных слоев.

Распределение изотопа Fe^{55,59} (предварительно нанесенного на поверхность образцов до обработки) по глубине образца определялось в виде автордиограмм при последовательном удалении поверхностных слоев. С учетом диаметра зоны взаимодействия плазмы разряда с поверхностью катода при указанных выше режимах (эти данные приведены в [6]) многократность воздействия разрядов зависела от величины МЭП и составляла ~75—250.

В работах по изучению воздействий единичных импульсов на железо установлено, что при разрядах в

воздухе и среде аммиака глубина проникновения азота в твердой фазе за период воздействия импульса не превышает нескольких микрометров [4]. Подобная глубина массопереноса наблюдалась и при воздействии на железо, титан, хром единичных импульсов на установке «Разряд» [3] при параметрах разрядов, соответствующих нашему эксперименту. Аналогичные результаты получены и при однократном воздействии на железо лазерных импульсов [7]. Столь небольшие глубины массопереноса при однократном воздействии во многих случаях ограничивают практическое использование данного процесса, например, для упрочнения.

Исследование явления многократности импульсного воздействия при лазерном облучении [7] и ультразвуковом воздействии [8] на массоперенос в твердой фазе показало, что глубина проникновения и распределения элементов в фиксированных точках существенно увеличиваются с ростом числа воздействий. Сравнивая результаты массопереноса, полученные в наших экспериментах (рис. 1 и 2), с рассмотренными выше нужно отметить аналогичную тенденцию в изменениях глубины массопереноса и концентрации элементов по глубине. Многократное воздействие разрядов увеличивает глубину массопереноса в 3—5 и более раз. В этом случае характерная глубина массопереноса может составлять 10—40 мкм. Подобная величина отмечена и при воздействии ультразвукового облучения [8], 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 (см. рис. 1 и 2) имеют максимум и подобны таковым, полученным при контактом ЭИЛ [2] и лазерном воздействии [7].

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. 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 [9, 10], что и уменьшает концентрацию исследуемого элемента в самой верхней зоне. Отсутствие жидкой фазы в зоне импульсного воздействия обычно не приводит к появлению максимума на начальном участке концентрационных кривых. Например, при ультразвуковом воздействии кривая распределения элементов не имеет максимума [8]. Подобный же характер концентрационных кривых, полученных в [3, 4] для единичных импульсных разрядов, где жидкая фаза практически всегда присутствует, связан с методическими особенностями исследо-

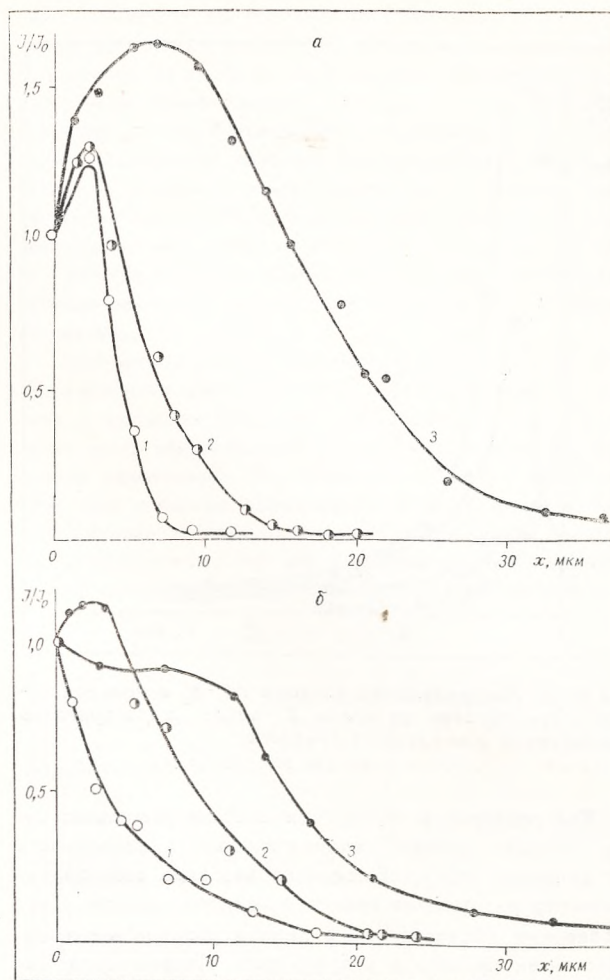


Рис. 1. Распределение изотопа $Fe^{55,59}$ в поверхностном слое образцов из стали 45 (а) и титана ВТ1-0 (б) после многократного воздействия импульсных разрядов: $U_c = 240$ В; 1, мм: 1—2; 2—1; 3—0,5

вания массопереноса. При его оценке в твердой фазе верхний закристаллизовавшийся слой жидкой фазы, в котором возможно конвективное перемешивание, предварительно шлифовывался (по мнению авторов это обеспечивало получение достоверных данных о массопереносе только в твердой фазе), т. е. на графиках отсутствовали данные о распределении элементов в зоне жидкой фазы. Следует отметить, что механическое шлифование не всегда позволяет точно зафиксировать границу зон жидкой и твердой фаз и может внести ошибку в результаты исследований.

Анализ концентрационных кривых, полученных при постоянной энергии разряда, выявил существенное влияние величины МЭП на массоперенос как в стали, так и в титане (см. рис. 1). Это в первую очередь связано с влиянием МЭП на особенности взаимодействия (электроэрозионное, термическое) плазмы импульсного разряда с поверхностью обрабатываемых материалов.

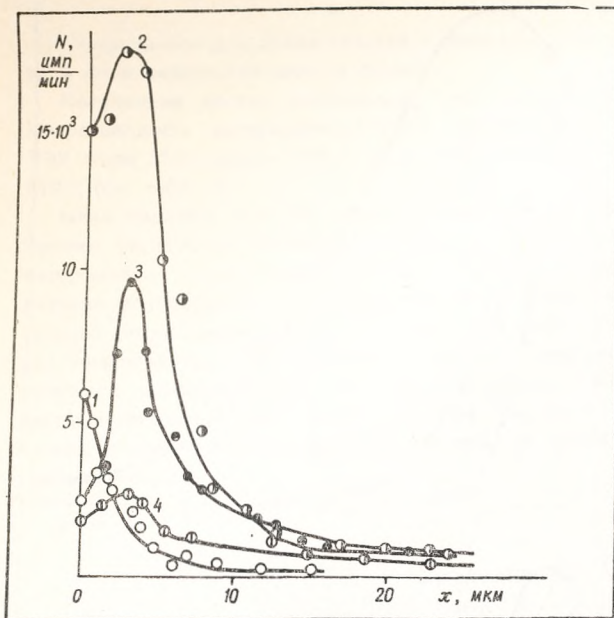
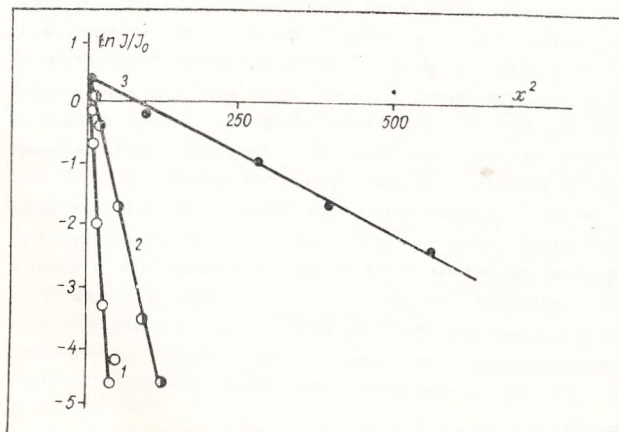


Рис. 2. Распределение изотопа $Fe^{55,59}$ в поверхностном слое образца из стали 3 после многократного воздействия импульсных разрядов: $l=0,5$ мм; U_c , В; 160 (1), 240 (2), 320 (3), 400 (4)

Как показано в [5, 6], при ЭИЛ на установках типа «Разряд» (режим недонапряжения) в зависимости от величины МЭП наблюдаются два вида электроэрозионного разрушения поверхности катода-детали, обусловленных образованием в период разряда электродных пятен первого и второго типа. Первые представляют собой быстроперемещающиеся катодные пятна, существующие независимо друг от друга и вызывающие незначительную эрозию поверхности катода — зона взаимодействия разряда с поверхностью электрода имеет вид многочисленных, отдельно расположенных

Рис. 3. Концентрационные кривые изотопа $Fe^{55,59}$ в твердой фазе катода из стали 45 в осях $\ln J/J_0-x^2$; $U_c=240$ В, l , мм: 2 (1); 1 (2), 0,5 (3)



лунки глубиной от долей до нескольких микрометров без явных следов жидкой фазы, вторые обладают меньшей скоростью перемещения и вызывают значительно большую эрозию, чем первые, и в зоне их воздействия появляется жидкая фаза материала электрода. Пятна первого типа преобладают при МЭП более 1,0—1,5 мм. Эти явления и определяют характер кривых рис. 1 и 2. Электронномикроскопические исследования показали, что при величине промежутка $l=2$ мм на поверхности катода наблюдаются мелкие электроэрозионные лунки глубиной 1—2 мкм, которые и являются зоной возможного появления паровой и жидкой фазы при взаимодействии пятен первого типа. Только в этой весьма небольшой зоне возможно конвективное перемешивание элементов, что и проявляется в появлении максимума кривой 1 (рис. 1, а) на глубине 2—3 мкм. На начальном участке аналогичен и ход кривой 2 (рис. 1), полученной при $l=1$ мм. Но при этой величине МЭП появляются пятна второго типа, возникают более обширные очаги жидкой фазы, уменьшается общая площадь воздействия плазмы разряда на электрод (увеличивается плотность теплового потока), что изменяет глубину массопереноса и распределение элементов по глубине. Когда в зоне действия 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, а), полученная при $l=0,5$ мм. Левая часть рис. 3 по своей протяженности вдоль оси x (x — глубина массопереноса) 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 $\ln J/J_0-x^2$ (рис. 3), свидетельствующих об одинаковом механизме массопереноса в твердой фазе во всех трех случаях [1, 3]. Некоторое отличие рис. 1, б, полученных при воздействии разряда на титан, связано в первую очередь с особенностями его электрической эрозии при ЭИЛ [10]. При $l=2$ мм, когда существуют только пятна первого типа, надо учитывать «взрывной» характер эрозии зоны 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 максимума (кривая 1, рис. 1, б). Некоторое постоянство концентрации элементов на участке слоя 0—12—15 мкм при $l=0,5$ мм (кривая 3, рис. 1, б) объясняется выбросом из зоны разряда частиц жидкой фазы и опять же интенсивным образованием окислов и нитридов в верхней зоне жидкой ванны, препятствующим конвективному перемешиванию.

Увеличение энергии разряда при постоянной вели-

чине МЭП, например при $l \sim 0,5-0,7$ мм, не вызывает однозначного роста массопереноса и концентрации элементов по глубине (рис. 2) подобно тому, как это наблюдается при контактном ЭИЛ [2]. 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 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 [6], 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 I (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, протекающих 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, созданного разрядом.

Если, используя данные [6], сопоставить плотности тепловых потоков при обработке стали на МЭП $l = 2,1$ и $0,5$ мм (в нашем случае при постоянной энергии разряда плотность теплового потока при различных значениях l определяется площадью взаимодействия плазмы разряда с поверхностью катода) с глубиной массопереноса, то эти соотношения соответственно равны $1,0; 1,4; 2,2$ и $1,0; 1,54; 3,0$. Из этих данных видно, что с уменьшением l и ростом плотности теплового потока глубина массопереноса почти пропорциональна последнему.

Таким образом, многократное воздействие импульсных разрядов, протекающих в режимах 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 concentra-

ции элементов по глубине по сравнению с воздействием единичных импульсов. При этом распределение элементов по глубине носит немонокотный характер — максимум концентрации наблюдается на некоторой глубине от обрабатываемой поверхности. В этих условиях воздействия глубина массопереноса может достигнуть десятков микрометров, 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 электрода, подобно тому как это наблюдается при лазерном, импульсно-дуговом и других методах обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Душенко В. Ф., Гитлевич А. Е., Ревуцкий В. М., Михайлов В. В. О возможном механизме диффузии при электроискровом легировании и других видах импульсного воздействия на металлы // Электронная обработка материалов. 1980. № 3. С. 36—39.
2. Ревуцкий В. М., Гитлевич А. Е., Михайлов В. В. и др. Исследование распределения элементов в электроискровых покрытиях с помощью радиоактивных изотопов // Там же. 1981. № 6. С. 32—35.
3. Ревуцкий В. М., Мазанко В. Ф., Зворыкин Л. О. и др. Влияние параметров импульсного разряда на распределение элементов электродов в электроискровых покрытиях // Там же. 1983. № 1. С. 22—24.
4. Ларинов Л. Н., Дубовицкая Н. В., Захаров С. М., Ченакин С. П. Ускорение диффузии азота под действием плазмы искрового разряда // Матер. 5-й Всесоюз. конф. «Взаимодействие атомных частиц с твердым телом». Ч. II. Минск, 1978. С. 157—160.
5. Гитлевич А. Е., Топала П. А., Кукун И. И. и др. О возможности упрочнения металлических поверхностей на установках для электроискрового легирования типа «Разряд» // Электронная обработка материалов. 1987. № 2. С. 24—27.
6. Гитлевич А. Е., Топала П. А., Снегирев В. А., Игнатков Д. А. Особенности электрической эрозии электродов при импульсных разрядах, протекающих в режиме недонапряжений // Там же. 1988. № 3. С. 9—12.
7. Гуревич М. Е., Ларинов Л. Н., Мазанко В. Ф. и др. Влияние многократного лазерного воздействия на массоперенос в железе // Металлофизика. Вып. 73. Киев, 1978. С. 80—83.
8. Герцижен Д. С., Кривко В. П., Ларинов Л. Н. и др. Ускорение диффузионных процессов в железе при многократном ударном нагружении // Физика и химия обработки материалов. 1979. № 4. С. 154—156.
9. Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Витюков В. В., Кисилев В. П. О механизме конвективного перемешивания при импульсном оплавлении поверхности металлов // ДАН СССР. 1986. 291. № 4. С. 843—847.
10. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревуцкий В. М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев, 1985. С. 196.