

А. Е. Гитлевич, П. А. Топала,
В. М. Ревуцкий, Л. Н. Шистик

г. Кишинев

Важным элементом в процессе электроискрового формирования покрытий из порошковых материалов является взаимодействие частиц порошка с каналом импульсного разряда. При попадании частиц в канал разряда происходит их нагрев, полное или частичное плавление или испарение, перенос на деталь-катод и взаимодействие материала частиц (в различных агрегатных состояниях) с материалом катода. Спектр явлений взаимодействия частиц с плазмой канала обеспечивает конечный результат — формирование покрытий на катоде, поэтому его анализ необходим для разработки технологии на базе рассматриваемого процесса.

В настоящее время используются два варианта электроискрового нанесения покрытий из порошковых

Взаимодействие частиц порошка с каналом импульсного разряда в условиях электроискрового нанесения покрытий

материалов [1—3]. В первом случае для создания рабочих импульсов применяют RC-генераторы и на межэлектродный промежуток (МЭП) накладывают постоянное напряжение величиной 0,5—5 кВ, при этом инициирование пробоя МЭП осуществляется частицами порошка, во втором — на МЭП подаются слаботочные высоковольтные импульсы, обеспечивающие пробой МЭП, а для формирования рабочих импульсов используются RC или тиристорные генераторы [3]. Второй вариант рассматриваемого процесса имеет ряд преимуществ по сравнению с первым.

При наложении на МЭП постоянного электрического поля затруднено управление процессом формирования наносимого слоя на деталь-катод. Это вызывает неравномерным поступлением и движением частиц

Рис. 1. Кадры скоростной съемки (СФР-граммы) развития импульсного разряда, инициированного высоковольтным слаботочным поджигом, при подаче в МЭП порошкового материала.

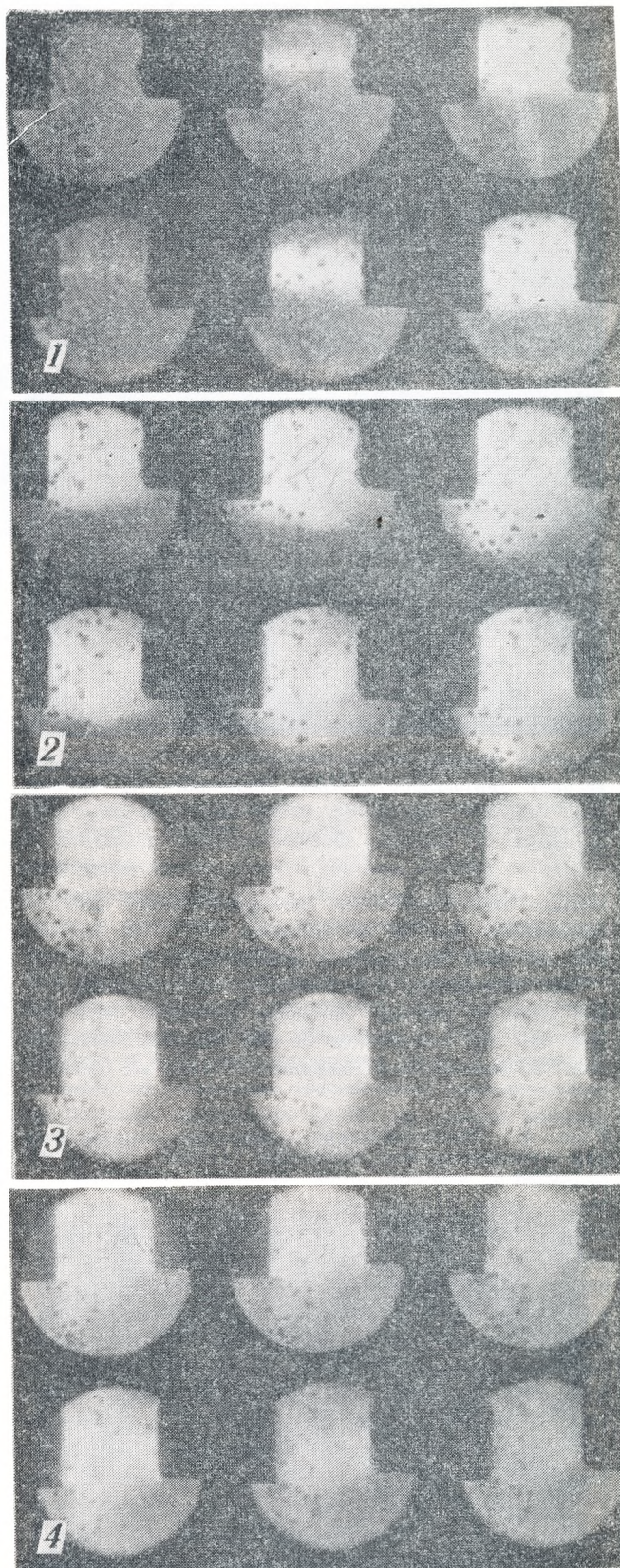
Время экспозиции одного кадра $\tau_k = 8 \cdot 10^{-6}$ с, напряжение на емкости, $U_c = 300$ В, величина МЭП $1 \sim 1$ мм

в МЭП, которые инициируют низковольтный сильный разряд с энергией, не всегда достаточной для плавления и нанесения всех частиц, находящихся в каждый момент времени в МЭП, так как рабочая емкость RC-генератора не всегда успевает зарядиться до требуемого напряжения. В этом случае невозможно вести процесс на оптимальной частоте с фиксированной энергией разряда, а значит, и формировать качественные по сплошности и равномерности покрытия [3].

Наложение на МЭП слаботочных высоковольтных импульсов позволяет в зависимости от физико-химических свойств используемых порошковых материалов задавать определенную частоту и энергию низковольтных рабочих импульсов, что дает возможность каждой наносимой частице пройти все фазовые превращения и исключить отрицательное влияние последующих разрядов на перенос и осаждение частиц на деталь-катод. При предварительной ионизации МЭП высоковольтным слаботочным разрядом за счет перераспределения энергии в канале импульсного разряда возможно получение более высокого выхода тепловой энергии из разряда. Как показано в [4], мгновенная тепловая мощность разряда с предварительной ионизацией газового промежутка в 1,7 раза превышает мгновенную тепловую мощность самостоятельного разряда той же энергии за счет уменьшения в энергетическом балансе потерь на ионизацию газа МЭП. Это явление позволяет повысить КПД данного процесса.

Основные аспекты взаимодействия частиц порошка с каналом импульсного разряда детально изучены для случая электроискрового нанесения покрытий из порошковых материалов в постоянном электрическом поле [3—5]. С помощью скоростной съемки показано, что инициирование пробоя МЭП при наложении постоянного электрического поля происходит подобно пробоям в вакууме. Попадая в МЭП, частицы электризуются, перемещаются к катоду и при приближении к последнему между частицей и катодом возникает микроразряд, который в дальнейшем инициирует низковольтный мощный разряд, ответственный за основные тепловые процессы, происходящие на электродах и с частицами в канале разряда.

Скоростная съемка показала, что при наложении импульсного электрического поля на МЭП динамика развития канала разряда и взаимодействие его с частицами порошка имеют некоторые особенности, хотя основной характер взаимодействия частиц с плазмой подобен первому случаю (скоростная съемка с по-



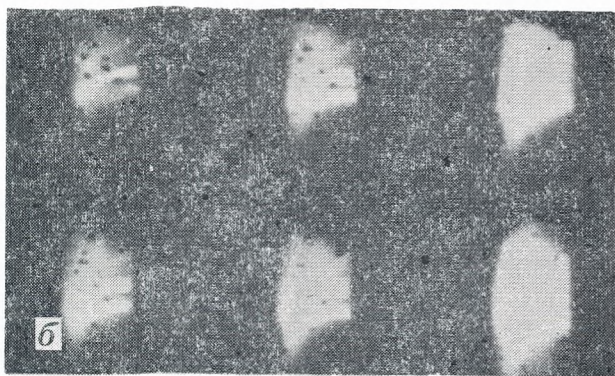
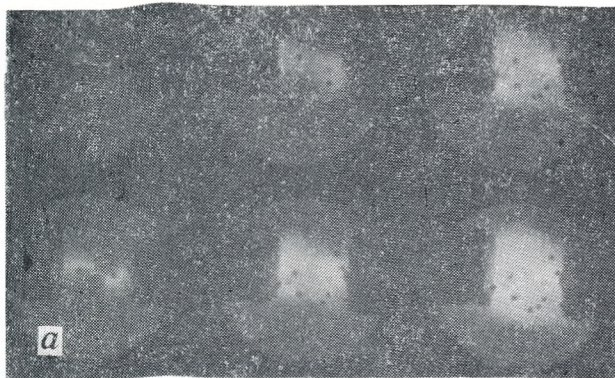
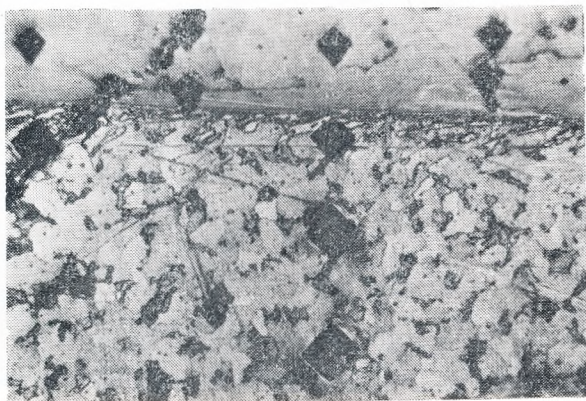


Рис. 2. Фрагмент скоростной съемки импульсного разряда при подаче в МЭП порошкового материала. Неоднородность развития канала разряда (а) и его многоканальность (б). Условия съемки аналогичны рис. 1

мощью сверхскоростного фоторегистратора СФР-2М проводилась при тех же условиях, что и при наложении на МЭП постоянного электрического поля [5].

При импульсном электрическом поле начальная стадия развития разряда проходит несколько интенсивнее, чем при постоянном за счет быстрой ионизации МЭП высоковольтным разрядом по всей его длине и

Рис. 3. Микроструктура покрытия, полученного при электроискровом нанесении сплава Сп3. $\times 200$



за более короткий промежуток времени (рис. 1, кадры 1—3) — отсутствуют фазы электризации частиц в постоянном электрическом поле, их движение к катоду с последующим микроразрядом между ними [3, 5]. Газоразрядная плазма заполняет МЭП за $10\text{--}20 \cdot 10^{-6}$ с, при этом свечение канала разряда поджигающего импульса на СФР-граммах занимает не более 1—2 кадров.

Если высоковольтный разряд происходит при наличии частиц порошка в МЭП, то его канал на СФР-граммах может иметь вид прерывистого (зигзагообразного) шнура, что связано с замыканием канала на частицах порошка. В этом случае возможно неравномерное развитие основного канала разряда и заполнение газоразрядной плазмой объема МЭП (рис. 2, а, кадры 2—4). Нагрев и взрывообразное испарение поверхности частиц под действием канала высоковольтного разряда чаще всего локализуют области более интенсивного развития плазмы в зоне электродов, что обусловлено наличием приэлектродных падений потенциала и высокой концентрацией заряженных частиц в этих зонах.

В нашем случае так же, как и при изучении динамики импульсных разрядов и электрической эрозии электродов при МЭП больше пробивных [6—8], проявляется многоканальный характер импульсных разрядов. Поэтому наряду с однородным свечением плазмы наблюдается структура плазменного канала с ярко выраженной локализованной сквозной канальностью — отдельные каналы проводимости с повышенной светимостью (рис. 2, б).

По данным СФР-грамм время существования газоразрядной плазмы в МЭП составляет $200\text{--}260 \cdot 10^{-6}$ с, что при прочих равных условиях несколько меньше, чем при наложении на МЭП постоянного электрического поля [5]. Очевидно, за счет более быстрого расширения канала разряда в начальной стадии разряда общее время существования газоразрядной плазмы уменьшается.

В начальной стадии процесса высоковольтный разряд (ВР) формирует тонкий плазменный шнур между электродами. Его максимальный поперечный размер не превышает долей миллиметра. После ионизации МЭП происходит низковольтный разряд рабочей емкости источника импульсов и за счет выделившейся энергии разряда между электродами формируется расширяющийся плазменный канал. Скорость его расширения на конечном этапе составляет $\sim 25\text{--}30$ м/с и за $20\text{--}30 \cdot 10^{-6}$ с он заполняет МЭП (рис. 1), причем размеры этого канала зависят от величины МЭП и параметров разряда. Как отмечалось выше, формирование плазменного канала может протекать равномерно по всему сечению МЭП или сначала развиваться более интенсивно в приэлектродных зонах (рис. 2, а). При определенных значениях МЭП канал может дробиться — проявляется многоканальность разряда. В представленном на рис. 2, б варианте дробления разряда каналы проводимости с повышен-

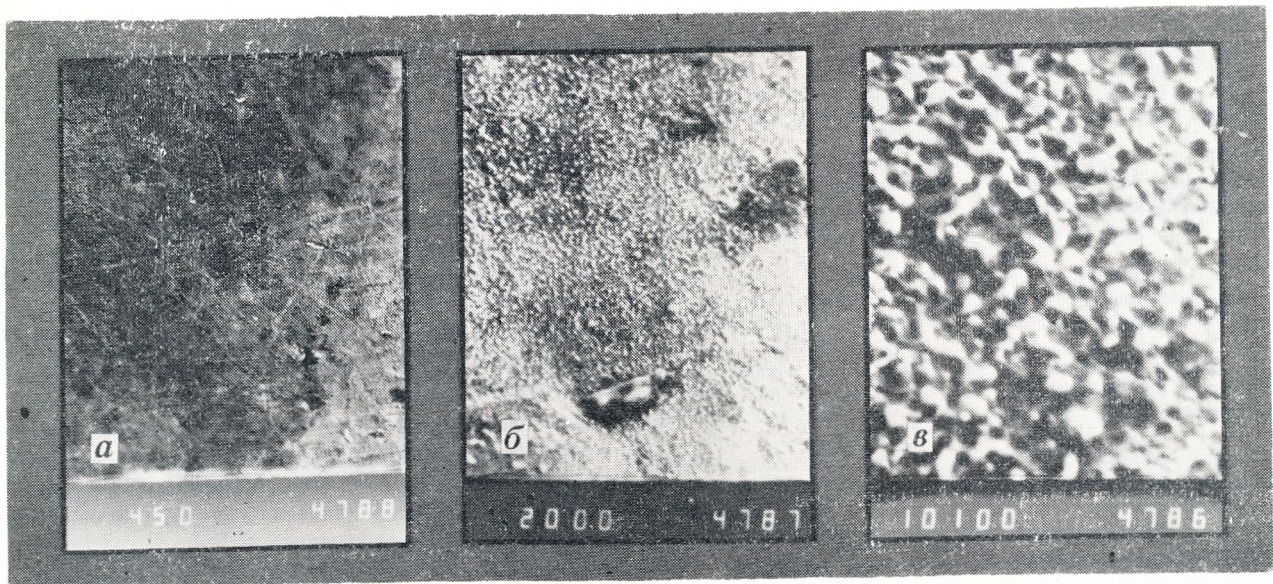


Рис. 4. Морфология поверхности СтЗ (зона пятен 1-го типа) после воздействия импульсного разряда. $U_c = 240$ В, $l = 2$ мм. $\times 450$ (а); $\times 2000$ (б); $\times 10\,000$ (в)

ной светимостью связывают пятна второго типа, возникающие на электродах [6].

Эффект дробления канала разряда проявляется более четко при увеличении МЭП, что соответствует и изменениям эрозионных процессов. Как установлено в [7, 8], при МЭП больше 1—2 мм единичная лунка начинает дробиться на несколько отдельных меньших размеров, появляются зоны воздействия, связанные с электродными пятнами 1-го и 2-го типов, существенно расширяется область электрода, подвергнутая эрозии. Относительное однородное свечение плазмы обычно наблюдается при МЭП меньше $\sim 1,5$ —2 мм. Такое состояние плазменного канала, конечно, более благоприятно для равномерного нагрева всех частиц, находящихся в его зоне, и формирования покрытия на катоде.

При МЭП, когда в зоне взаимодействия канала разряда с поверхностью катода возникает единая лунка со сплошной областью жидкой фазы, условия взаимодействия частиц с подложкой подобны условиям контактного ЭИЛ [3]. В этом случае возможны процессы перемешивания жидких фаз материалов частиц и подложки, их взаимной диффузии, образование сплавов, механических смесей, химических соединений и т. п. Металлографические исследования показали, что в сформированных слоях происходит комплекс физико-химических превращений, подобный тому, когда анодами служат компактные материалы. Как правило, поверхностный слой состоит из белой зоны, зоны взаимодействия наносимого материала с подложкой и зоны материала основы, подвергнутой термическому воздействию импульсного разряда (рис. 3).

При ярко выраженной многоканальности на электродах существуют участки с различной температурой и величиной эрозии, что в первую очередь влияет на однородность структуры и фазового состава поверх-

ностного слоя. Помимо этого, при условиях возникновения преимущественно пятен 1-го типа сами физические процессы, связанные с взаимодействием каналов разряда с поверхностью катода, весьма неблагоприятны для формирования слоя покрытия. Так, в зоне разряда практически отсутствует жидкая фаза на катоде, а миграция каналов разряда со взрывным характером эрозии в точке контакта каналов с поверхностью электродов [3, 9] затрудняет процессы сплавления и диффузии. Это подтверждает и электронная микроскопия поверхности катода в зоне пятен 1-го типа (рис. 4). Как отмечалось в [7], такая зона имеет вид свежетравленной поверхности за счет удаления загрязнений и окислов разрядами и появлению неглубоких (0,3—3 мкм) эрозионных лунок с диаметром от долей до нескольких микрометров. Даже при весьма большом увеличении ($\times 10^4$) не удается обнаружить явных следов жидкой фазы.

Зависимость переноса частиц порошка на катод от величины МЭП (рис. 5) в значительной мере может быть связана с отмеченными выше явлениями. Резкое уменьшение массопереноса происходит при МЭП более 1,0—1,5 мм, что в большинстве случаев соответствует появлению на СФР-граммах многоканальности разряда и возникновению на поверхности электродов эрозионных областей с пятнами 1-го и 2-го типа. На таких МЭП, помимо уменьшения плотности энергии в канале при его увеличении существенную роль начинают играть процессы, связанные с дроблением канала разряда и изменением характера эрозии на электродах.

Экспериментально наблюдается несколько видов взаимодействия плазмы с частицами в зоне образо-

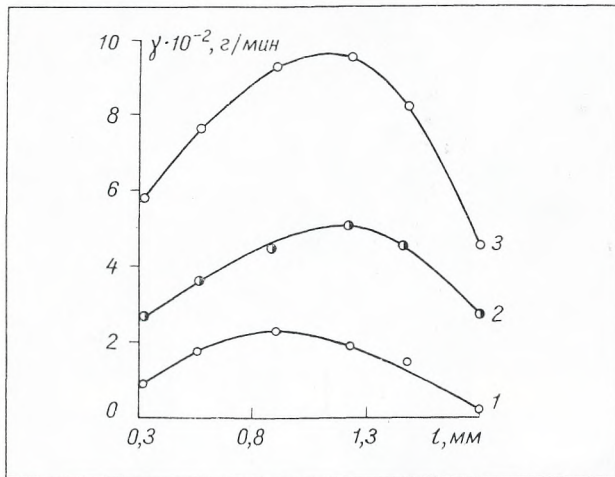
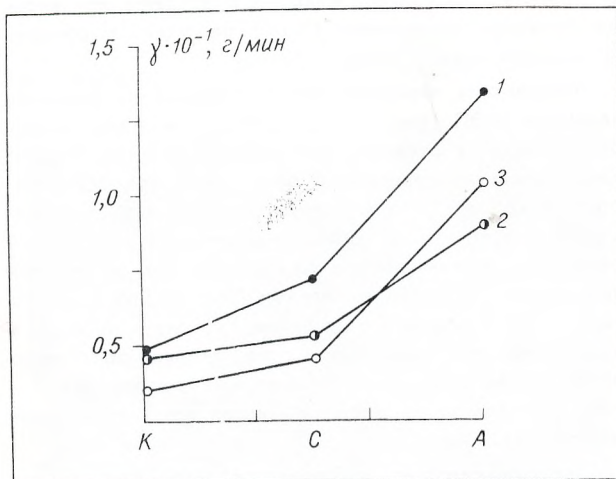


Рис. 5. Зависимость массопереноса от величины МЭП при электроискровом нанесении хрома (1), карбида вольфрама (2) и бронзы (Br0-10) (3) на сталь 45. $U_c = 240$ В

вания канала. На периферии канала возможен отброс частиц ударной волной [5]. При больших скоростях движения частиц поперек канала, особенно в периферийных зонах, некоторые частицы практически не претерпевают фазовых изменений и размеров, проходя через канал. Возможно частичное оплавление и испарение частицы без ее переноса на катод. При оптимальных условиях процесса частица нагревается, плавится, частично испаряется, и эта многофазная система наносится на поверхность катода.

Рис. 6. Зависимость массопереноса порошкового материала от величины МЭП при введении его в различные зоны канала разряда: К — катодная зона; С — середина МЭП; А — анодная зона. Материал порошка: 1 — сплав СНГН, 2 — хром; 3 — бронза Br0-10. $U_c = 240$ В, $l = 0,8$ мм



Количество частиц, попадающих в зону газоразрядной плазмы, связано с объемом расширяющегося канала разряда. В реальных условиях обработки [10] анодом обычно служит вращающийся медный электрод, заточенный на конус (возможно использование и дискового электрода), при этом канал разряда имеет вид усеченного или остроконечного конуса. Размеры его определяются величиной МЭП и энергией разряда. В таком канале плотность энергии по сечению и падение потенциала вдоль его оси распределяется неравномерно, поэтому и силы, действующие на частицу, находящуюся в нем, а также нагрев, перемещение, осаждение частиц на катоде будут зависеть от зоны попадания их в канал разряда.

Если проследить за влиянием зоны ввода частиц порошка в канал разряда на их перенос в диапазоне МЭП до критических величин, то можно четко зафиксировать оптимальные условия (рис. 6). (Частицы попадались на торец электродов).

Максимальный массоперенос, полный нагрев и испарение частиц наблюдаются при их вводе в зону анода. Это, очевидно, связано с несколькими факторами. Во-первых, при таком вводе обеспечивается максимально возможное пребывание частицы в плазме канала до ее взаимодействия с катодом. Во-вторых, основным фактором, определяющим перемещение частиц, является электродинамическая сила, которая должна быть максимальной в зоне анода из-за высокого анодного падения потенциала (в [11] показано, что при относительно больших МЭП анодное падение потенциала U_a может превышать катодное U_k в 2—3 раза), что и способствует появлению у частиц более высоких значений скоростей вдоль плазменного канала по сравнению с введением частиц на других его участках. Это уменьшает количество частиц, проходящих поперек канала без изменения вектора скорости и увеличивает число их, осевших на катоде. В-третьих, конусная форма плазменного канала приводит к более высокой объемной плотности энергии у анода, что, возможно, интенсифицирует в этой зоне теплообмен между частицами и каналом разряда.

Таким образом, исследование динамики развития канала разряда и его взаимодействия с поверхностью электродов, а также электроэрозионных явлений и морфологии поверхности показало, что при определенных величинах МЭП возникают условия, неблагоприятные для формирования покрытий из порошковых материалов на детали-катоде. Величина МЭП, при которой практически прекращается перенос и осаждение частиц на деталь-катод, обусловлена перераспределением энергии разряда и изменением характера его взаимодействия с поверхностью электродов. Оптимальная зона подачи порошка в канал разряда, обусловленная величиной электродинамической силы, действующей на частицу, и формой канала разряда, находится в области анода (у электрода-инструмента).

1.
р
А
О
2.
р
Н
О
3.
р
Л
4.
з
ш
С
5.
р
ш
н
С
6.
Д
—

Литература

1. А. с. 509381. СССР. МКИ³ В 23 Р 1/18. Способ электроискрового нанесения покрытий / Б. Р. Лазаренко, А. Е. Гитлевич, С. П. Фурсов, Н. Я. Парканский. Оpubл. 05.04.76. Бюл. № 13.
2. А. с. 837746. СССР. МКИ³ В 23 Р 1/18. Способ электроискрового нанесения покрытий / А. Е. Гитлевич, Н. Я. Парканский, В. М. Ревуцкий, В. В. Михайлов. Оpubл. 15.06.81. Бюл. № 22.
3. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревуцкий В. М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев, 1985.
4. Мещеряков Г. М. Влияние предварительной ионизации газа на характер перераспределения энергии в искровом разряде // ЖТФ. 1965. XXXV. Вып. 7. С. 1236—1241.
5. Лазаренко Б. Р., Парканский Н. Я., Гитлевич А. Е., Ревуцкий В. М. Особенности взаимодействия частиц порошка с разрядом при электроискровом легировании // Электронная обработка материалов. 1979. № 1. С. 29—31.
6. Мицкевич М. К., Гитлевич А. Е., Бакуто А. И. и др. Динамика импульсного разряда в условиях использования его для электроискрового легирования // Там же. 1986. № 3. С. 22—25.
7. Гитлевич А. Е., Топала П. А., Куку И. И. и др. О возможности упрочнения металлических поверхностей на установках для электроискрового легирования типа «Разряд» // Там же. 1987. № 2. С. 24—27.
8. Гитлевич А. Е., Топала П. А., Снегирев В. А., Игнатков Д. А. Особенности электрической эрозии электродов при импульсных разрядах, протекающих в режиме недонапряжения // Там же. 1988. № 3. С. 9—12.
9. Некрашевич И. Г., Бакуто И. А. К вопросу о современном состоянии теоретических представлений об электрической эрозии металлов // Электроискровая обработка металлов. М., 1963. С. 23—28.
10. Парканский Н. Я. Исследование процесса электроискрового нанесения покрытий из порошковых материалов в электрическом поле: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1979.
11. Исследование физических закономерностей деструкции и конденсации материала электродов при высокопоточных импульсных разрядах // Отчет физ.-техн. ин-та АН БССР. № гос. рег. 01.83.00.14.758. 1985.