

А.М. Парамонов, Е.А. Пасинковский, А.В. Коваль

К ВОПРОСУ РАСШИРЕНИЯ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Широкому применению способа электроискрового легирования (ЭИЛ) на практике препятствует его невысокая производительность. Основная причина этого заключается в том, что промышленные установки для ЭИЛ как с неразобщенными, так и с разобщенными генераторами импульсного тока укомплектованы в основном низкочастотными вибраторами.

В установках для ЭИЛ вибраторы служат для периодической коммутации анода с катодом. В таких системах процесс формирования искровых импульсов можно осуществлять в ограниченной пространственно-временной зоне движения электрода, а частота искровых импульсов равняется частоте колебания электрода.

Попытка заменить вибросистему вращающимися электродами показала, что твердосплавный дисковый электрод приводит к большому абразивному износу детали, а качество получаемых покрытий значительно ухудшается. Лучшие результаты получены с применением многоэлектродного вращающегося инструмента на пружинных подвесках [1, 2], а также вращающегося щеточного инструмента. Однако последний применяется при нанесении покрытий из пластичных материалов, таких как серебро, медь, алюминий, и др. Использование многоэлектродного вращающегося инструмента при нанесении покрытий из твердых материалов ограничено ввиду того, что с повышением скорости вращения электроды, ударяясь о деталь, крошатся, а их головки и оправки работают в режиме сильных вибраций уже при скоростях вращения головки 150–250 об/мин. При таких скоростях ее вращения даже при наличии десяти электродов частота формирования синхронных искровых импульсов не превышает 50 Гц.

Вопрос повышения частоты требует специального изучения, так как с повышением частоты вибрации электрода растет его скорость (при прочих равных условиях) и на долю искрового разряда остается все меньшее время [3]. В литературе [4] имеются сведения об оптимальной длительности искровых импульсов, она определена в пределах 10–150 мкс. Однако эти данные были получены при использовании релаксационных генераторов с частотой вибрации электрода, равной 100 Гц, и поэтому требуют дополнительного уточнения.

Из-за отсутствия приемлемых для практического использования аналитических выражений, связывающих формирование покрытий катода с энергетическими параметрами искровых импульсов, разработка технологических процессов упрочнения носит индивидуальный характер и осуществляется практически методом подбора энергетических параметров. Производительность ЭИЛ в режимах, обеспечивающих приемлемое качество покрытий, невысокая. Экспериментальный материал, полученный разными исследователями на различных установках, корректному обобщению не поддается из-за использования большого числа вторичных (не основных) параметров искровых импульсов. Исследования производились без учета влияния движения электрода на распределение импульсного тока между искровой и короткозамкнутой стадиями. Применение неразобщенных источников импульсного тока приводит к появлению дуговых составляющих разряда, часто имеющих значения величин тока 50–150 А.

Однако при ЭИЛ существуют условия, при которых возможно нанесение покрытий толщиной до 300 мкм и более с высокой шероховатостью поверхности.

Поэтому важно отыскать такие параметры регулирования процессом, которые при сохранении необходимых условий для формирования большой толщины позволили бы снизить шероховатость покрытий. Одним из таких путей является снижение энергии импульсов тока при сохранении их интегрального влияния на процесс формирования покрытий за счет увеличения частоты следования импульсов. Практические результаты электроискрового легирования на повышенных частотах [5–7] убедительно доказывают перспективность исследований в этом направлении. Перечисленные вопросы и отсутствие аналитического материала по высокочастотному вибрационному ЭИЛ определили первостепенность анализа расширения частотного диапазона ЭИЛ с учетом пространственно-временных зон движения электрода и ограничений на их сокращение [8].

На процесс переноса материала при ЭИЛ оказывает влияние характер движения электрода (анода). Одной из причин этого является изменение расстояния между электродами во время искрового импульса. Повышение частоты колебания электрода за счет увеличения его скорости может привести к нежелательному распределению энергии импульсов между рабочей стадией (искровой разряд) и стадией короткозамкнутого состояния электродов. При этом энергия, выделяющаяся на стадии короткозамкнутого состояния электродов, не будет участвовать в переносе материала на катод и выделится в разрядном контуре в виде тепла. Для исключения неконтролируемого распределения энергии импульсов тока выполнены исследования пространственно-временных зон движения электрода, определены ограничения на возможное сокращение этих зон. С целью рационального увеличения частоты вибрации электрода и повышения достоверности экспериментальных результатов проведено исследование синхронизации искровых импульсов с движением колеблющегося электрода.

Вначале мы проанализировали характерные пространственно-временные зоны движения электрода с учетом влияния движения вибрирующего электрода на работу генератора искровых импульсов и распределения их энергии в искровом промежутке.

Выделим характерные пространственно-временные зоны движения колеблющегося электрода и с учетом их функциональных нагрузок определим резервы зон и ограничения на их сокращение.

На рис. 1 приведены характерные пространственно-временные зоны движения электрода.

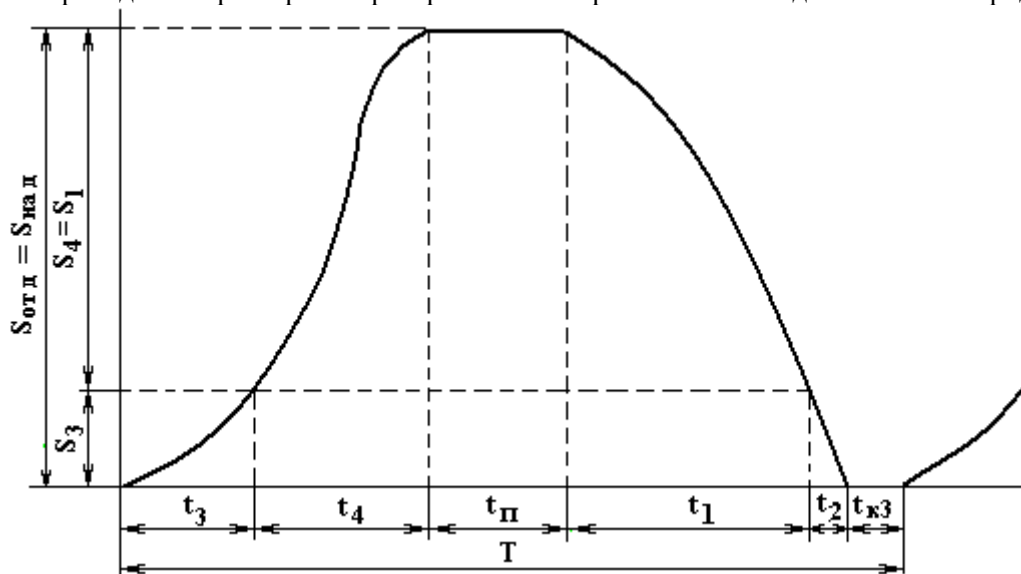


Рис. 1. Пространственно-временные зоны движения электрода

Полное расстояние (S), пройденное электродом за период колебания, состоит из: расстояния, пройденного электродом навстречу детали ($S_{на \delta}$); расстояния, пройденного электродом при движении от детали ($S_{от \delta}$).

При движении электрода навстречу детали, в общем виде пройденное им расстояние равно

$$S_{на \delta} = S_1 + S_2, \quad (1)$$

где S_1 – расстояние, пройденное электродом от крайнего верхнего положения до положения, в котором начинается электрический пробой промежутка; S_2 – пробойное расстояние между электродами для данных параметров искровых импульсов тока.

В свою очередь

$$S_2 = S_2' + S_2'' + S_2''' , \quad (2)$$

где S_2' – расстояние, пройденное электродом за время существования искрового импульса тока; S_2'' – расстояние, пройденное электродом с момента окончания действия искрового импульса тока до момента начала гальванического контактирования электродов; S_2''' – расстояние, пройденное электродом с момента начала гальванического контактирования с деталью до их устойчивого замыкания.

При движении электрода от детали в общем случае пройденное расстояние

$$S_{от \partial} = S_3 + S_4 , \quad (3)$$

где S_3 – расстояние, на котором сохраняются условия существования искрового разряда для данных параметров искровых импульсов тока; S_4 – расстояние, пройденное электродом от момента нарушения условий существования искрового разряда до момента достижения электродом верхнего крайнего положения.

Каждой пространственной зоне движения электрода соответствует временная зона. Для удобства обозначим их соответствующими индексами. В общем случае время движения электрода к детали

$$t_{на \partial} = t_1 + t_2 + t_{кз} , \quad (4)$$

где $t_{кз}$ – время, в течение которого электроды устойчиво замкнуты, а t_2

$$t_2 = t_2' + t_2'' + t_2''' . \quad (5)$$

Время движения электрода от детали

$$t_{от \partial} = t_3 + t_4 + t_{п} , \quad (6)$$

где $t_{п}$ – время пребывания электрода в крайнем верхнем положении.

Период колебания электрода

$$T = t_{на \partial} + t_{от \partial} , \quad (7)$$

либо с учетом (4) и (5)

$$T = t_1 + t_2 + t_{кз} + t_3 + t_4 + t_{п} . \quad (8)$$

Так как период есть величина, обратная частоте вибрации, очевидно, что увеличения частоты колебания электрода можно достигнуть за счет использования резервов вспомогательных временных зон. Однако сокращение времени этих зон можно производить до определенных пределов, так как каждая временная зона выполняет определенные функции.

Проанализируем функции, выполняемые временными зонами, исходя из эквивалентной схемы электроискровых установок (рис. 2) и термобаланса на электродах.

Функции зон t_1 , t_4 , $t_{п}$

1. В интервале этих зон обеспечивается заряд рабочей емкости.
2. Отвод в пространство тепла, полученного электродом в процессе разряда.

Функции зон t_2 , t_3

1. В интервале этих зон может осуществляться электроискровой разряд.

Функции зоны $t_{кз}$

1. Отвод в пространство тепла, полученного электродом в процессе разряда.

2. Для разобренных схем эту зону можно использовать для заряда накопительного конденсатора.

3. Повышение интенсивности диффузионного процесса за счет прогрева пораженной зоны (вариант неразобренной схемы RC).

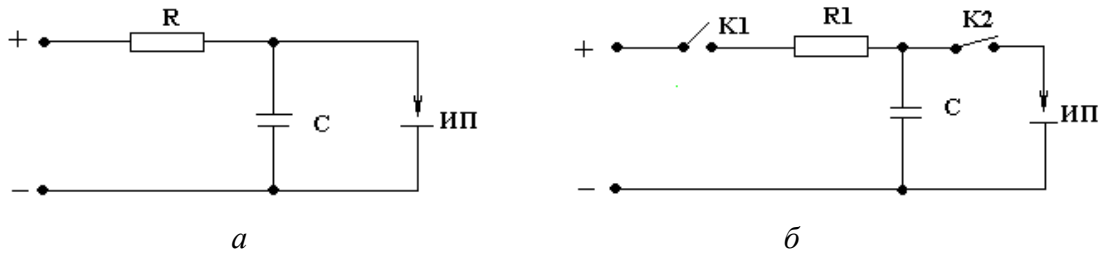


Рис. 2. Эквивалентные схемы электроискровых установок

С учетом вышеприведенных функций рассмотрим вопрос о том, какие обоснованные ограничения можно наложить на сокращение характерных временных зон движения электрода. Эти ограничения необходимо накладывать при решении задачи повышения частоты вибрации электрода.

Очевидно, зоны t_1 , t_4 , t_{Π} могут быть уменьшены до величины, при которой выполняются условия:

$$a) \quad t_1 + t_2 + t_4 > t_{\text{зар}} + t_{\text{ком}}, \quad (9)$$

где $t_{\text{зар}}$ – время полного заряда емкости; $t_{\text{ком}}$ – коммутации ключевого элемента, равное

$$t_{\text{ком}} = t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}} \quad (10)$$

$$b) \quad E_{\Pi} = E_0 \quad (11)$$

где E_{Π} – энергия, накапливаемая электродом в течение периода; E_0 – энергия, отводимая от электрода в течение периода.

На зону t_2 накладывается ограничение, диктуемое электрическими параметрами разрядного контура, в свою очередь зависящими от технологических требований процесса легирования

$$t_2 \geq t_{\text{раз}} \quad (12)$$

Если соотношение (12) не будет выполнено, часть энергии, запасенной в конденсаторе, будет израсходована во время короткозамкнутого состояния электродов и, не производя полезной работы, выделится в разрядном контуре в виде тепла.

При легировании с формированием искровых импульсов в зоне на нее накладывается ограничение исходя из запаздывания управляющего сигнала с блока управления и времени отпириания коммутатора:

$$t_3 \geq t_{\text{зап}} + t_{\text{вкл}} \cdot \kappa_{\Pi}, \quad (13)$$

где $t_{\text{зап}}$ – время запаздывания сигнала на коммутатор, обусловленное инерционностью устройства, управляющего коммутатором разрядной цепи; $t_{\text{вкл}}$ – время полного отпириания коммутатора разрядной цепи; κ_{Π} – коэффициент приоткрытия коммутатора до состояния, обеспечивающего искровой разряд.

В релаксационных генераторах время заряда конденсатора составляет преобладающую величину времени в периоде и может быть снижено за счет соответствующих схемных решений без ущерба для процесса легирования. Также может быть снижена до минимума и величина времени короткозамкнутого состояния электродов ($t_{\text{кз}}$), так как в этой зоне не переносится материал анода на деталь.

Анализ характерных пространственно-временных зон движения электрода показал, что решение вопроса повышения частоты вибрации электрода можно получить путем сокращения временных зон до пределов, оговоренных в ограничениях.

На основании анализа предложено использовать зону t_3 для формирования в ней второго искрового импульса тока [9]. Этого можно достигнуть при определенных схемных решениях генератора искровых импульсов. Такие решения позволяют дважды за период колебания электрода производить искровые разряды и соответственно повысить производительность процесса легирования [10].

Теперь определим время, в течение которого вибрирующий электрод пребывает в условиях искрового разряда.

Известно, что искровой и дуговой формам самостоятельного электрического разряда присущи свои механизмы и преобладающие полярности переноса материала. Однако четкой грани между указанными формами разрядов в литературе не обнаружено.

Из того факта, что искровой разряд является, как правило, кратковременным, а дуговой – продолжительным, можно сделать вывод, что одно из отличий, вероятно, обусловлено длительностью протекающего через промежуток тока. Тогда повышение длительности импульсного тока может привести к инверсии полярности переноса.

Отсутствии данных по распределению энергии импульсов тока между искровой и короткозамкнутой стадиями при ЭИЛ с вибрирующим электродом оставляет нерешенным вопрос о возможности расширения диапазона импульсов тока по длительности.

Для технически грамотного конструирования экспериментального и производственного оборудования необходимость ясности в данных вопросах очевидна.

Определенные представления о возможности расширения диапазона импульсного тока по длительности при ЭИЛ можно получить, определив время пребывания вибрирующего электрода в условии искрового разряда. Это время (t_2 см. рис. 1), за которое электрод проходит пробойное расстояние.

Распределение энергии импульсного тока между искровой и дуговой стадиями можно определить прямым экспериментом только с учетом результата по измерению t_2 (рис. 3).

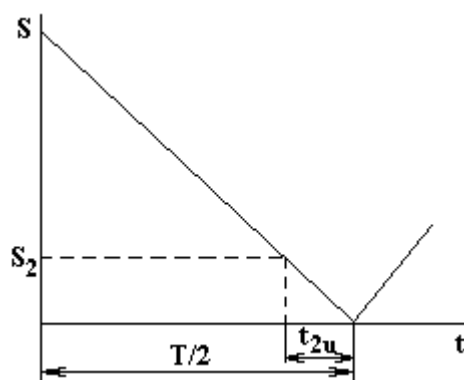


Рис. 3. Измеренное время прохождения электродом пробойного расстояния

Будем искать t_{2P} из соотношения

$$\frac{S_{на \partial}}{S_2} = \frac{T}{2t_{2P}}, \quad (14)$$

полученного из аппроксимированной траектории движения электрода. Условия аппроксимации: $t_{на \partial} = t_{от \partial}$; $t_{кз} = t_{п} = 0$:

$$\frac{dS_{на \partial}}{dt} = \frac{dS_{от \partial}}{dt} = \text{const}.$$

Рассчитаем t_{2P} для случая с характерными в практике ЭИЛ условиями: напряжение на электродах – 250 В; частота вибрации электрода – 100 Гц; амплитуда вибрации электрода – 1,5 мм.

Величину пробойного расстояния $S_{пр}$ найдем, воспользовавшись зависимостью пробойного расстояния от напряжения, подводимого к промежутку [11]. Это расстояние составляет около 3 мкм.

Тогда

$$t_{2P} = \frac{S_2}{2fS_{на \partial}} = 10 \text{ мкс}.$$

Из полученного значения величины t_{2P} следует, что для характерного представителя релаксационных генераторов – установки типа ЭФИ-10М это время составляет лишь 10% от длительности искровых импульсов (см. таблицу).

Параметры установки ЭФИ-10М

Электрические	Технологические					
	Чистовые		Средний	Грубые		
Рабочий ток, (А)	0,5–0,7	0,7–1,2	1,25–1,5	1,5–2,0	2,0–2,5	2,0–2,5
Ток к. з., А	2,5	3,0	3,5	4,5	4,8	5,0
Напряжение, В	15	25	45	75	140	200
Энергия в импульсе, Дж	0,036	0,1	0,32	0,9	3,14	6,4
Ток в импульсе, А	67–144	67–180	133–500	233–833	383–1000	1000–1133
Длительность импульса, мкс	100	100	100	100	100	100
Удельное время легирования, мин/см ²	4–16	3–8	2–8	2–7	1–6	0,5–5
Привес за минуту, мг/(см ² ·мин)	0,8	1,9	3,6	6,7	10,7	14,7

Литературные данные зависимости технологических характеристик легированных поверхностей от электрических параметров импульсов тока не отражают присутствия каких-либо составляющих, кроме электроискровой. Нам представляется, что на данный вопрос можно ответить, проведя непосредственное измерение времени, за которое электрод преодолевает пробойное расстояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Золотых Б. Н.* Электроискровой контактный способ упрочнения металлических поверхностей. М.-Л., Госэнергоиздат, 1951.
2. *Фурсов С. П., Гитлевич А. Е., Любчик М. Я. и др.* Электроискровое серебрение // *Электронная обработка материалов*. 1970. № 2. С. 23–27.
3. *Фурсов С. П., Любчик М. Я., Парамонов А. М.* Исследование влияния частоты вибрации легирующего электрода на технологические характеристики при электроискровом легировании // *Материалы докладов VIII научно-технической конференции*. Кишинев, 1972.
4. *Лазаренко Н. И.* Современный уровень и перспективы развития электроискрового легирования металлических поверхностей // *Электронная обработка материалов*. 1967. № 5. С. 46–58.
5. *Верхотуров А. Д., Парамонов А. М., Бондарь В.Т.* Влияние частоты импульсного тока на формирование упрочненного слоя при электроискровом легировании // *Порошковая металлургия*. 1980. № 7 (211). С. 90–94.
6. *Хабибулина Н. В., Фурсов С. П., Запарова З. А., Парамонов А. М. и др.* Применение установок чистового легирования для повышения качества медицинского инструмента // *Электронная обработка материалов*. 1982. № 1. С. 89–90.
7. *Хабибулина Н. В., Пleshкова И. П.* Электроискровое легирование медицинских инструментов // *Всесоюзная конференция по электроискровому легированию металлических поверхностей*. Кишинев, 19–21 октября 1976.
8. *Парамонов А. М.* Технологии и оборудование для высокочастотного вибрационного электроискрового упрочнения деталей и инструмента: Автореф. канд. дис. Киев, КПИ, 1986.
9. *Парамонов А. М., Любчик М. Я.* О влиянии вибрации обрабатываемого электрода при электроискровом легировании // *Тезисы докладов VII конференции молодых ученых Молдавии*. Кишинев: Штиинца, 1970.
10. *Парамонов А. М., Фурсов С. П., Добында И. В.* Способ электроискрового легирования. Авт. свид. № 656793. – Бюл. изобр. и откp., 1979. № 14.
11. *Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г.* Справочник по физике. М., 1965.

Поступила 07.09.05

Summary

The analysis of space-time bands of motion of welding rod was conducted. The versions of restrictions are analyzed, which on them are superimposed. The diagrams of data of bands are given.