

Разработка источников питания для электроискрового легирования с ручным вибрирующим электродом

А. М. Парамонов,* А. В. Коваль

Институт прикладной физики,
г. Кишинев, MD-2028, Молдова, *e-mail: sasha.covali@mail.ru

Поступила 04.07.2019
После доработки 26.09.2019
Принята к публикации 01.10.2019

Рассмотрены основные схемы, на базе которых создаются установки для электроискрового легирования. Представлены схемы генераторов искровых импульсов от первых релаксационных RC-генераторов до разобращенных полупроводниковых. Предложены способы совершенствования схем и улучшения характеристик покрытий. Показано, что процесс высокочастотного легирования с применением ручного вибрирующего электрода значительно улучшает качественные характеристики нанесенных слоев.

Ключевые слова: электроискровое легирование, генераторы искровых импульсов, источники питания, синхронизация генераторов, высокочастотное легирование

УДК 621.755

DOI: 10.5281/zenodo.3640580

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение предъявляет высокие требования к механизированным станкам и машинам. Особо нагруженные детали либо изготавливают из специальных материалов (спец. стали, металлокерамика и др.), либо используют для повышения качественных характеристик их поверхностного слоя различные электрофизические и электрохимические методы обработки. Также необходимо восстанавливать изношенные поверхности деталей, зачастую дорогостоящих. Наиболее перспективным методом модификации и восстановления поверхностного слоя является электроискровое легирование (ЭИЛ) [1, 2].

Как известно, метод ЭИЛ был разработан Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко в 40-х годах [2–5]. Сущность ЭИЛ заключается в явлении электрической эрозии и полярного переноса материала анода на катод при протекании электрических разрядов в газовой среде. Благодаря таким преимуществам как: локальность обработки, улучшение качественных характеристик поверхностного слоя деталей (модификация или нанесение электропроводящих материалов), низкие удельная энергоемкость и стоимость, способ вызвал большой интерес как у исследователей, так и у производителей. Но сдерживающими факторами использования ЭИЛ являются такие недостатки, как высокая шероховатость и пористость покрытия, невысокая производительность и несплошность нанесенного слоя. Эти недостатки относительно, поскольку в промышленности востребованы разные покрытия и где-то они могут стать достоинствами.

Исследование процесса ЭИЛ идет в двух направлениях: создание и применение новых материалов, разработка новых источников питания. В последнее время внимание сосредоточилось в основном на первом направлении [6–11]. Исследователи полагают, что получение различных наноструктур в поверхностных слоях катода позволит улучшить физико-механические свойства наносимых слоев.

В то же время за последние два десятилетия авторами не было найдено работ, в которых приводились бы исследования новых источников питания для легирования. При обзоре публикуемых трудов стало ясно, что исследования проводятся на установках, сделанных еще в советское время, или «новых» внешне, но конструктивно таких же, как и ранее выпускавшиеся. Между тем именно от электрических параметров источников питания и применяемых рабочих органов в первую очередь зависит качество получаемых результатов.

Цель данной работы – обзор существующих схем для электроискрового легирования с ручным вибрирующим электродом, исследование новых схем, разработанных авторами за последние десятилетия, предложения по повышению производительности процесса ЭИЛ и качества получаемых покрытий.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СХЕМ

Как правило, установка ЭИЛ состоит из источника питания, генератора искровых импульсов (ГИИ), генератора питания рабочего органа (ГПРО), блоков управления ГИИ и ГПРО, рабочего органа. В качестве последнего выступает вибратор или механизированный (вращающийся) электрод-инструмент. На современном этапе развития ЭИЛ разработка техноло-

гического процесса упрочнения или восстановления поверхности детали включает выбор материала покрытия и определение энергетического режима (параметров импульсного тока: частоты импульсов и их энергии, используемого электрода-инструмента), осуществляемое практически методом подбора режимов до получения покрытия, наиболее полно удовлетворяющего требованиям по шероховатости поверхности и толщине.

В ЭИЛ существуют два основных направления развития:

- низкочастотная обработка, которая обеспечивает: высокую производительность, большой массоперенос, высокую шероховатость и пористость;

- высокочастотная обработка, которая обуславливает: высокую производительность, массоперенос в широком диапазоне, низкую шероховатость и пористость.

Изменение частоты, длительности и амплитуды импульсов, начало и их прерывание в нужные моменты, исключение влияния оператора – это задачи, которые решаются при проектировании генератора.

Несмотря на широкую географию производителей установок (СССР, Болгария, Япония, Венгрия, Франция и др.), все их многообразие и по сей день сводится к двум десяткам базовых схем [12], которые классифицируют по:

- принципу накопления энергии (с емкостным, индуктивным, механическим накопителем, без накопителя);
- степени влияния физических свойств электроискрового промежутка на характеристики электроискровых импульсов генератора (зависимые и независимые);
- степени связи между источником тока и электроискровым промежутком (неразобщенные и разобщенные);
- типу импульсов (униполярные, знакопеременные);
- принципу действия (релаксационные, машинные, машинно-вентильные, коммутаторные, инверторные);
- типу коммутационных элементов, используемых в электрических схемах (ламповые, полупроводниковые, искровые и др.).

Зачастую разобщенные генераторы искровых импульсов и генераторы питания вибратора похожи, поэтому схемы приводятся либо на примере одних, либо других.

Первоначально в силу простоты, надежности и дешевизны наиболее широкое распространение получили неразобщенные релаксационные генераторы типа RC (рис. 1) с напряжением питания

в диапазоне 20–250 В. Установки, построенные по такой схеме, имеют малую мощность и показали хорошие результаты в основном для электроискрового серебрения [13]. С увеличением мощности существенно вырастают потери на токоограничивающем сопротивлении R1, поскольку через него текут токи заряда конденсатора C1, рабочих импульсов и короткого замыкания искрового промежутка (ИП), что приводит к резкому снижению коэффициента полезного действия (КПД).

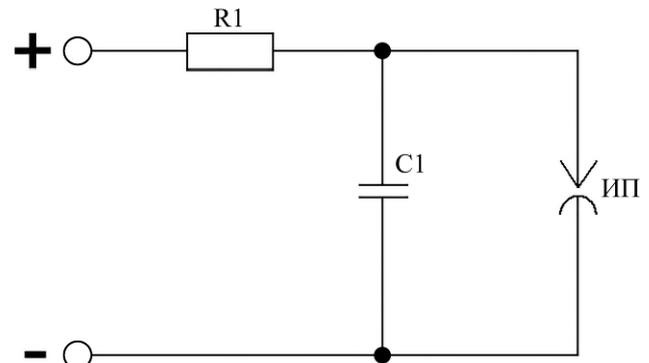


Рис. 1. Схема неразобщенного генератора RC типа.

Для уменьшения потерь было разработано несколько вариантов схем с индуктивностью (LC, RCL, LRCL и др.), в качестве которой могли выступать не только дроссели, но и трансформаторы с повышенным рассеянием (установки ЭФИ-ЭЛЕРОМ-10, ЭФИ-25, -45, -46 и др.). Но даже новые схемы не позволяют получать КПД установки выше 25–30%. Тем не менее данную схему используют до сих пор в исследованиях, например при легировании на длинных импульсах [14, 15]. На рис. 2 показано покрытие, полученное на RC-генераторе. Ввиду высокой шероховатости оно пригодно только для восстановления посадочных мест под подшипники. Как вариант была разработана схема неразобщенного СС-генератора [16], но, несмотря на более высокий КПД (40–50%), широкого распространения она не получила.

Недостаток релаксационных генераторов в них самих – частота и амплитуда импульсов, их возбуждение и разрядное напряжение зависят от состояния искрового промежутка. Так, при увеличении силы прижатия энергия единичного импульса уменьшается, а частота импульсов увеличивается, и наоборот. Разброс в энергетических параметрах от импульса к импульсу не позволяет получать однородные качественные покрытия как в исследованиях, так и на производстве. Существенное влияние оказывает и вибрационная система. Как правило, вибраторы работают с удвоенной частотой сети (100 Гц) и имеют только регулировку амплитуды вибрации. Для получения импульсов с большой энергией



Рис. 2. ЭИЛ на RC-генераторе.

необходимо увеличить емкость рабочего конденсатора:

$$E = \frac{CU^2}{2},$$

где E – энергия импульса; C – емкость конденсатора; U – напряжение холостого хода.

Но при данной частоте работы вибратора и наличии в зарядной цепи сопротивления или/и индуктивности конденсатор успевает зарядиться до напряжения гораздо ниже, чем напряжение холостого хода. В результате зачастую происходит только обискривание обрабатываемой поверхности без переноса материала. Эти недостатки обусловили переход к разобщенным генераторам. Их схемы более сложные, но они позволяют: повысить КПД, увеличить частоту обработки, управлять энергией импульсов и др. Кроме того, поскольку разобщенные генераторы позволили исключить протекание постоянного тока через искровой промежуток, стало возможным более точно рассчитывать энергию, выделяющуюся в искровом промежутке. Один из первых генераторов такого типа был предложен Б.Н. Золотых [17]. В качестве коммутаторов в нем использована релейная система.

Основная трудность при разработке источников питания – это искровой промежуток. Он является весьма сложным элементом электрической цепи в силу того, что:

1) большое количество факторов влияет на его состояние – состав среды и межэлектродное расстояние, материал, формы и шероховатости контактирующих поверхностей;

2) нелинейность электрических характеристик – электрическое сопротивление изменяется от мегаом до миллиомов;

3) человеческий фактор – силы прижима и перемещения электрода непостоянны;

4) влияние термоэлектронной эмиссии ввиду интегрального эффекта при высокой частоте обработки.

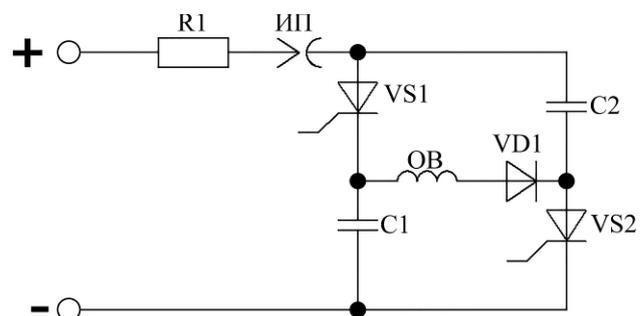


Рис. 3. Схема совмещенного генератора искровых импульсов и питания вибратора.

Начало применения полупроводниковых приборов открыло новый этап развития ЭИЛ, поскольку они позволили в значительной степени решить упомянутые проблемы. В качестве ключей первоначально использовали тиристоры, что позволило значительно улучшить параметры процесса: повысить частоту и энергию обрабатывающих импульсов, повысить частоту работы вибратора [18]. Но главное, в исследовательских целях стало возможным проводить более точный подсчет энергии импульсов и их количества. Основные два типа разобщенных генераторов – раздельные и совмещенные. В раздельных генераторах для искровых импульсов и питания обмотки вибратора используют два разных генератора и отдельные силовые ключи. В совмещенных – генератор один и силовые ключи являются общими (рис. 3). Это было продиктовано эконо-

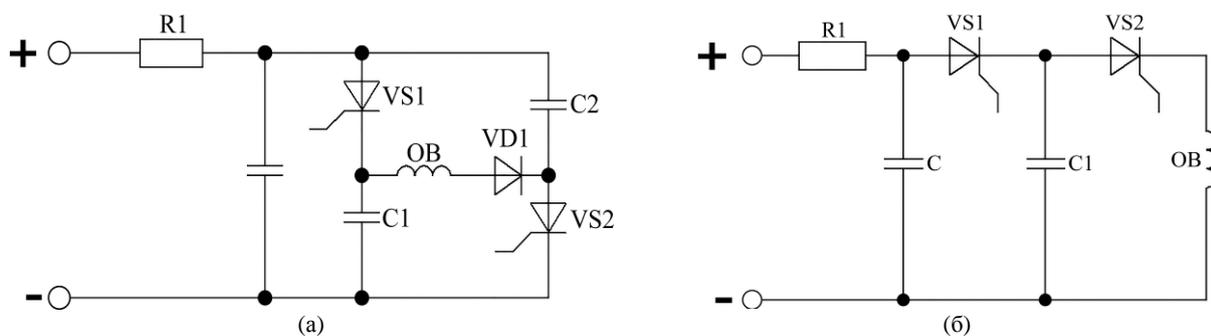


Рис. 4. Схемы разобщенных генераторов питания вибратора: (а) – однофазная; (б) – двухфазная.

мическими соображениями, поскольку первоначально тиристоры были дорогими. В данной схеме попеременное открытие и закрытие тиристоров VS1 и VS2 обеспечивают зарядку-разрядку рабочих конденсаторов C1 и C2 при протекании рабочих импульсов через искровой промежуток (ИП). При этом токи заряда-разряда протекают через обмотку вибратора (ОВ), что обеспечивает вибрацию электрода-инструмента. Но у данной схемы есть значительный недостаток – через обмотку вибратора текут два тока: питания обмотки и рабочих импульсов, что приводит к сильному перегреву обмотки, снижению рабочей мощности и КПД. Вследствие этого данные схемы особого распространения не получили.

В настоящее время в установках используются в основном отдельные разобщенные генераторы – однофазные и двухфазные. В однофазных схемах рабочий конденсатор заряжается и разряжается через искровой промежуток за один такт генератора. Например, на схеме, представленной на рис. 4а, протекание тока через обмотку вибратора обеспечивается поочередной зарядкой-разрядкой на нее рабочих конденсаторов C1 и C2 при открытии тиристоров VS2 и VS1.

В двухтактных схемах необходим подготовительный такт для зарядки рабочей емкости (рис. 4б). Таким образом, сначала сигнал от блока управления поступает на тиристор VS1, который открывается, и через него заряжается рабочий конденсатор C1 от буферного конденсатора C. При зарядке C1 ток в цепи падает до нуля, и тиристор VS1 закрывается. Следующий импульс от блока управления запускает тиристор VS2, и конденсатор C1 разряжается через него на обмотку вибратора (или искровой промежуток). Следует отметить, что схемы на рис. 4 имеют ограничения при применении для питания обмотки вибратора. Поскольку через обмотку ток течет только в одном направлении, то наблюдается подмагничивание сердечника, что приводит к снижению КПД и амплитудно-частотных характеристик вибратора. Для исклю-

чения подмагничивания обмотку питают биполярными импульсами, например, как на рис. 5 (однофазная схема). Зарядный ток рабочей емкости C1 протекает через тиристор VS1 и обмотку вибратора, а разрядный – через тиристор VS2 и обмотку вибратора. В данных схемах необходимо наличие небольшого сопротивления R, которое играет защитную роль. При работе на высоких частотах вследствие индуктивности обмотки вибратора возможны случаи, когда оба тиристора открыты, а наличие сопротивления исключает аварийную ситуацию.

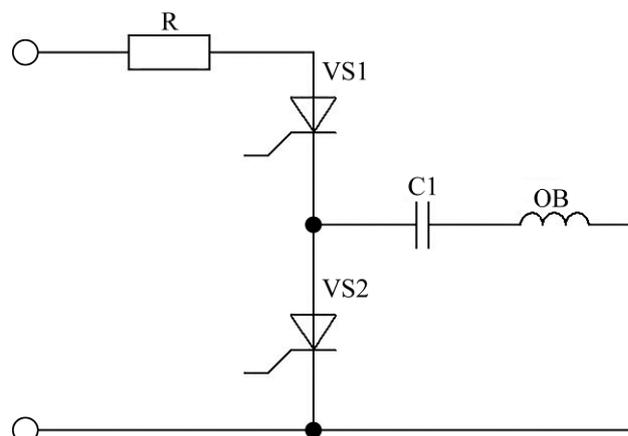


Рис. 5. Схема питания вибратора биполярными импульсами.

В настоящее время в качестве ключевых элементов пытаются использовать не только тиристоры, но и полевые, и IGBT транзисторы. В силу особенностей процесса – активно-индуктивная нагрузка проводов, сложная нагрузка в виде искрового промежутка (резкие скачки и прерывания тока), блоки управления и сами генераторы искровых импульсов на транзисторах получаются сложными. Требуется обеспечить ряд защитных мер для сохранения работоспособности ключевых элементов. В то же время такие достоинства тиристоров, как способность работать при значительных перегрузках (в 10 раз по току, в отличие от 3–5 для транзисторов), простота управления (автоматическое прекращение протекания тока при уменьшении его до нуля или прохождении через

ноль), обеспечивают их широкое применение в силовых установках.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СХЕМ ГЕНЕРАТОРОВ

На современном этапе можно без труда влиять на качественные параметры процесса ЭИЛ путем изменения длительности, амплитуды, формы импульсов, подаваемых на искровой промежуток. Рассмотрим это на примере схемы универсального источника электрических импульсов, разработанной в лаборатории ИПФ АНМ [19]. Такое схемное решение позволяет применять данный источник не только для ЭИЛ, но и для электрохимической обработки (рис. 6).

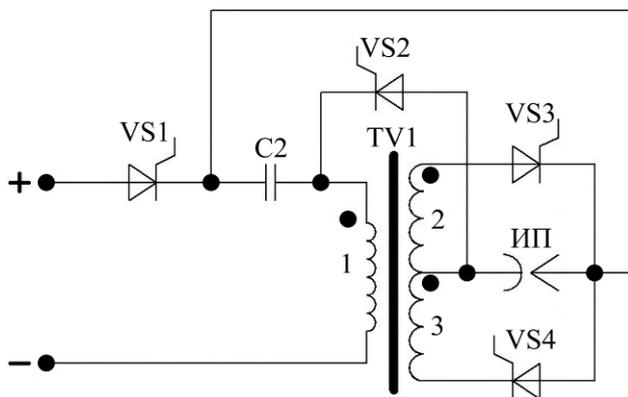


Рис. 6. Схема универсального источника питания.

Для получения униполярных импульсов, отличающихся друг от друга по форме, длительности и амплитуде, тиристорами управляют следующим образом. Накопительный конденсатор $C2$ разряжен. На управляющий электрод зарядного тиристора $VS1$ подается управляющий импульс. Тиристор $VS1$ открывается, и начинается зарядка накопительного конденсатора $C2$ через первичную обмотку 1 импульсного трансформатора $TV1$. При этом на вторичной обмотке 2 импульсного трансформатора $TV1$ появляется напряжение. При подаче импульса на управляющий электрод тиристора $VS3$ он открывается и подключает к вторичной обмотке 2 импульсного трансформатора $TV1$ искровой промежуток, в результате чего в последнем протекает ток прямой полярности и проскакивает искровой разряд. По окончании зарядки накопительного конденсатора $C2$ ток в первичной обмотке 1 импульсного трансформатора $TV1$ прекращается, и зарядный тиристор $VS1$ закрывается. Затем подают управляющий импульс на управляющий электрод разрядного тиристора $VS2$, в результате чего он открывается. При этом накопительный конденсатор $C2$ подключается к искровому промежутку и через последний протекает ток снова в прямом направ-

лении. По окончании разряда накопительного конденсатора $C2$ ток в данной цепи прекращается, и разрядный тиристор $VS2$ закрывается. Далее процесс повторяется.

Разнополярные импульсы получают, задействуя тиристор $VS4$. Накопительный конденсатор $C2$ разряжен. На управляющий электрод зарядного тиристора $VS1$ подается управляющий импульс. Тиристор $VS1$ открывается, и начинается зарядка накопительного конденсатора $C2$ через первичную обмотку 1 импульсного трансформатора $TV1$. При этом на вторичной обмотке 3 импульсного трансформатора $TV1$ появляется напряжение. При подаче импульса на управляющий электрод тиристора $VS4$ он открывается и подключает к вторичной обмотке 3 импульсного трансформатора $TV1$ искровой промежуток, в результате чего в последнем протекает ток обратной полярности и проскакивает искровой разряд. По окончании зарядки накопительного конденсатора $C2$ ток в первичной обмотке 1 импульсного трансформатора $TV1$ прекращается, и зарядный тиристор $VS1$ закрывается. Затем подают управляющий импульс на управляющий электрод разрядного тиристора $VS2$, в результате чего он открывается. При этом накопительный конденсатор $C2$ подключается к искровому промежутку и через последний протекает ток в прямом направлении. По окончании разряда накопительного конденсатора $C2$ ток в этой цепи прекращается, и разрядный тиристор $VS2$ закрывается. Далее процесс повторяется. Использование разнополярных импульсов позволяет расширить технологические возможности источника питания. За счет этого появляется возможность регулирования температуры в локализованных зонах обработки, что позволяет снимать оксидные пленки и проводить электроискровую шлифовку, используя регулирование соотношения длительностей разнополярных импульсов. Примеры получаемых импульсов показаны на рис. 7.

Для получения качественных и воспроизводимых результатов необходимо рассматривать всю систему легирования как единое целое: блок управления генератором искровых импульсов, генератор искровых импульсов, блок управлением вибратора, генератор питания вибратора. Установка для ЭИЛ функционально должна представлять из себя схему на рис. 8. Блок питания (БП) обеспечивает выпрямление входного напряжения и подает заданное напряжение на блок управления (БУ), генератор искровых импульсов (ГИИ) и генератор питания

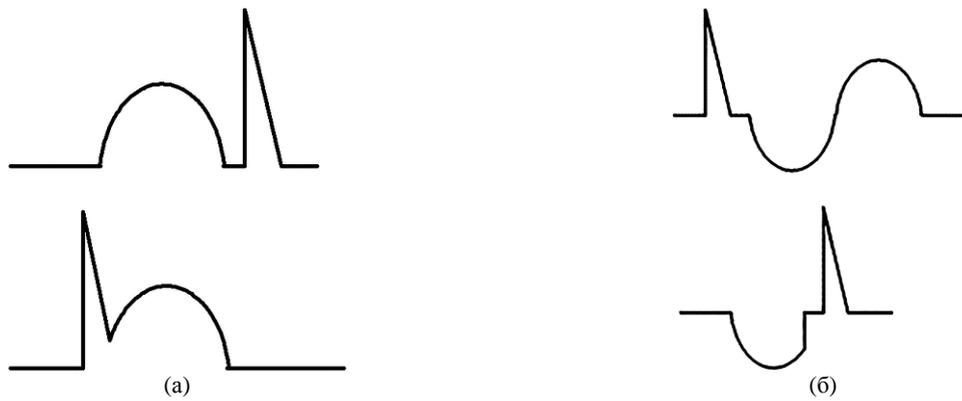


Рис. 7. Формы сигналов источника: (а) – униполярный режим; (б) – биполярный.

рабочего органа (ГПРО). Блок управления одновременно управляет ключевыми элементами в ГИИ и ГПРО, поскольку искровые импульсы должны приходить на искровой промежуток (ИП) синхронизированно с положением электрода в пространстве. Блок управления, подавая измерительные импульсы, оценивает состояние ЭП, образованного деталью и рабочим органом (электрод вибратора, многоэлектродная головка, вращающийся электрод-инструмент и др.). Как только возникают условия для искрового разряда с БУ, подается сигнал на ГИИ, с которого искровые импульсы подаются на рабочий орган и деталь.

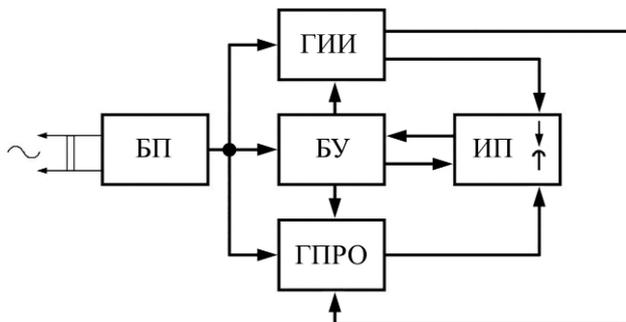


Рис. 8. Блок-схема установки для ЭИЛ.

Еще Б.Р. Лазаренко показал, что величина эрозии прямо пропорциональна количеству импульсов, прошедших через промежуток [20]. Выпускаются установки, в которых генератор искровых импульсов работает с частотой до 20–22 кГц [21]. Но большинство установок комплектуется вибраторами, работающими от сети с частотой 100 Гц. В некоторых случаях при использовании полупроводникового генератора питания вибратора ее можно поднять максимум до 600–800 Гц, но дальнейшее повышение невозможно в силу конструктивных ограничений вибратора (масса колеблющихся частей, амплитуда вибрации). В случае отсутствия синхронизации между генераторами (искровых импульсов и питания вибратора) большая часть импульсов не приносит пользы и расходуется либо на нагрев подводящих проводов, либо

вхолостую [22]. Для большего повышения частоты обработки необходимо создавать новые вибрационные системы с уменьшенными весом колеблющихся частей и амплитудой вибрации. Например, вибраторы, описанные в [12], позволили подняться по частоте до 2 кГц при амплитуде вибрации 0,1–0,15 мм.

Кроме того, было показано, что есть две зоны, в которых это может реализоваться: при подходе электрода к детали и при отходе от нее. В результате при использовании вибратора, работающего с частотой 2 кГц, на искровой промежуток будут поступать импульсы с частотой 4 кГц. Возможно и дальнейшее повышение частоты до 8 кГц [23, 24] при синхронизации искровых импульсов с движением электрода. Качество поверхностей при высокочастотном легировании очень хорошее (рис. 9).



Рис. 9. Пример ЭИЛ на частотах 1000 (слева) и 2000 Гц (справа).

Необходимо отметить тот важный момент, что, кроме значительного улучшения качества покрытий, повышение частоты обработки позволяет повысить КПД, уменьшить потребляемую мощность и массогабаритные показатели установки. Так, в классических установках, когда применяются вибраторы с частотой 100 Гц, емкости накопительных конденсаторов могут достигать до 1500–2000 мкФ. При повышении частоты вибрации до 600–800 Гц емкости уменьшаются до 200–300 мкФ и менее. В установках с частотами до 2000 Гц используют 14–60 мкФ. Соответственно потребляемая мощность уменьшается в 2–4 раза (высокоча-

стотные установки потребляют 300–400 Вт вместо 1000–1500 Вт). При высокочастотном ЭИЛ наблюдается интегральный эффект – несмотря на малую энергию единичного импульса, высокая частота их поступления в искровой промежуток обеспечивает накопление энергии и разогрев электродов в зонах локализации импульсов. Дополнительную лепту вносит и уменьшенная амплитуда вибрации электрода, который успевает уплотнить покрытие до его значительного остывания. В результате нанесенное покрытие становится более плотным и однородным.

Другой вариант обработки на высокой частоте – безвибрационное легирование. Периодическое контактирование обеспечивается за счет осцилляции, возникающей при перемещении электрода-инструмента по поверхности детали в силу наличия на их поверхностях микронеровностей. Как показано в [25], это является перспективным методом получения высококачественных покрытий, особенно на деталях, чувствительных к перегреву (режущие кромки, зубные штифты и др.) (рис. 10).



Рис. 10. Пример обработки режущего инструмента при безвибрационном легировании.

На основе проведенных исследований влияния частоты обработки (искровых импульсов и вибрации электрода) при легировании на высоких частотах было предложено выделить следующие особенности:

1) если на момент очередного импульса тока температура электрода и детали опустилась до исходной (окружающей среды), то такое легирование можно назвать легированием единичными импульсами;

2) если температура электрода и детали (или одного из них) не снижается до исходной – это частотное легирование, которое может быть двух видов: температура не снижается до исходной на обоих электродах или не снижается на одном из электродов, то есть получаем либо анодное, либо катодное частотное легирование.

В большинстве случаев (кроме упрочнения кромок режущего инструмента) массо-

габаритные показатели обрабатываемой детали позволяют эффективно отводить тепло из обрабатываемой зоны. При этом конец электрода может нагреваться вплоть до красного каления (при большой энергии импульсов или высокой частоте их следования). Это необходимо учитывать при легировании спеченными твердыми сплавами с кобальтовой связкой (Т15К6, ВК6, ВК8 и др.). Перегрев электрода приводит к его разрушению из-за выгорания кобальта. В результате на поверхности детали появляются бугорки (рис. 11) и невозможно получить качественный слой. Только использование массивных электродов и их интенсивное охлаждение позволяют существенно улучшить результат легирования.

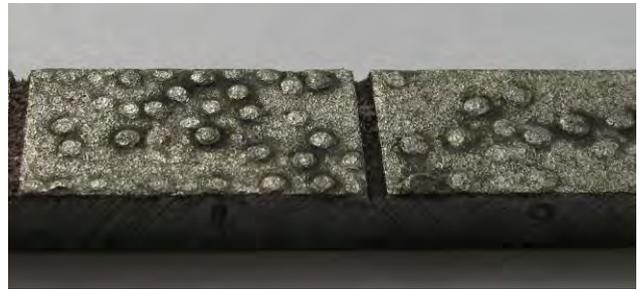


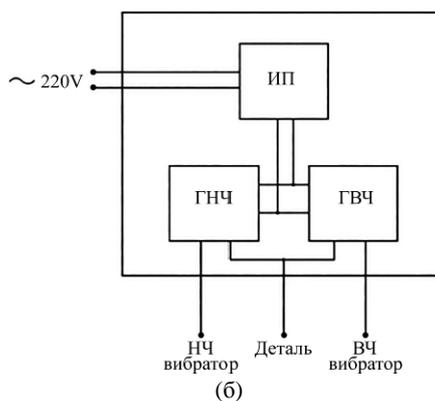
Рис. 11. Деталь, легированная сплавом Т15К6.

В то же время для нанесения материалов с высокой теплопроводностью (алюминий, медь, латунь, бронза и др.) именно ввод в искровой промежуток большого количества энергии и хороший разогрев легирующего электрода обеспечивают нанесение покрытия значительной толщины.

Получать достаточно толстые (до 0,4–0,5 мм) и плотные покрытия удается при совмещении низкочастотной и высокочастотной обработки. В результате исследований была создана установка «ПЭЛ-2028», в которой совмещены высокочастотный и низкочастотный генераторы искровых импульсов (рис. 12). Она позволяет проводить низкочастотную обработку с регулировкой длительности и начала синхронизации искровых импульсов. Низкочастотная обработка ведется на частоте 100 Гц, высокочастотная – до 1500 Гц с применением высокочастотного вибратора. Источник питания (ИП) обеспечивает напряжение 100–120 В. В генераторах низкой (ГНЧ) и высокой частоты (ГВЧ) используются конденсаторы емкостью 3300 и 10–50 мкФ соответственно. В обоих режимах генерация искровых импульсов синхронизирована с положением электрода в пространстве. Максимальная мощность установки составляет 600 Вт (300–350 Вт для высокочастотного режима, 500–600 Вт – для низкочастотного).



(a)



(б)

Рис. 12. Установка «ПЭЛ-2028» (а) и ее блок-схема (б).



(a)



(б)

Рис. 13. Покрытие сплавом BK8 (а) и T15K6 (б): слева (на каждом рисунке) – низкочастотный режим, справа – низкочастотный + высокочастотный.

Повышенное качество покрытий достигается благодаря чередованию режимов. Легирование с частотой 1500–2000 Гц и энергией 0,15–0,25 Дж позволяет выровнять и уплотнить покрытие, полученное при низкочастотном режиме. На основе проведенных работ были предложены и разработаны две технологии получения многослойных коррозионностойких покрытий.

По технологии [26] образец из стали 45 послойно легировали сплавом BK8 и кобальтом. Применение последнего позволяет повышать толщину получаемых покрытий и улучшать их структуру. Нанесение по три слоя BK8 и кобальта позволяет уменьшить коррозионные потери в 4–5 раз. Дополнительно были получены образцы для проведения поверхностного пластического деформирования (ППД). При этом существенно улучшились условия трения даже без использования смазки. Сплав BK8 и покрытия из него очень износостойки, но на практике очень важно, чтобы было стойким все сопряжение – деталь и контртело. Благодаря ППД происходит уменьшение шероховатости покрытия, убираются острые грани и выступы на поверхности покрытия из BK8 и стойкость контртела возрастает. Важно, чтобы первоначально на деталь наносился сплав BK8, а потом кобальт, благодаря чему значительно улучшается приработка сопряжения, уменьшается или даже ликви-

дируется задиристость, существенно уменьшается износ контртела, и сопряжение служит намного дольше. Необходимо также отметить, что кобальт лучше наносить на высокочастотном режиме (1500–2000 Гц), в результате чего покрытие получается практически беспористым.

По технологии [27] на образцы наносили покрытие сплава BK8 толщиной 0,2–0,3 мм в три этапа. На первом этапе вели обработку на мягком режиме – длительность импульсов 30 мкс, частота 1200–1500 Гц. В результате получили покрытие толщиной 0,1–0,15 мм с малой шероховатостью и малым числом пор. На втором этапе работали на грубом режиме – длительность импульсов 1000 мкс, частота 50–100 Гц. При этом наносилось покрытие толщиной 0,15–0,2 мм. На третьем этапе обработка снова велась на мягком режиме – длительность импульсов 30–40 мкс, частота 1200–1500 Гц. При этом ранее нанесенное покрытие выглаживалось, становилось более однородным и сплошным. В результате на поверхности образца (рис. 13) формируется износостойкое покрытие малой шероховатости, содержащее меньшее количество пор, чем при обычной технологии. Это приводит к уменьшению токов анодного растворения более чем в 10 раз по сравнению с необработанной сталью.

ВЫВОДЫ

В ходе проводимых работ было установлено, что:

1) в схемотехническом плане оптимальным решением является синхронизация подачи искровых импульсов с положением электрода в пространстве. Для обеспечения оптимальных условий нанесения покрытий в процессе легирования необходимо менять не только частоту импульсов и их длительность, но также форму и полярность. В перспективе необходимо изучить возможность управления каждым электрическим импульсом;

2) изменение формы импульсов, а также легирование на обратной полярности улучшают качество наносимых покрытий;

3) в силу интегрального эффекта при высокочастотном легировании покрытия получают менее шероховатыми и пористыми;

4) чередование низкочастотных и высокочастотных режимов позволяет получать достаточно толстые и плотные покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Задорожний Р.Н. *Труды ГОСНИТИ*. 2013, **113**, 420–423.
2. Бурумкулов Ф.А., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И. и др. *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструмента*. Саранск: Красный Октябрь, 2003.
3. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электроискровая эрозия металлов*. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1944.
4. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Физика электроискрового способа обработки металлов*. Вып. 1. М.: Госэнергоиздат, 1946.
5. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электроискровая обработка металлов*. М.: Госэнергоиздат, 1959.
6. Паустовский А.В., Ткаченко Ю.Г., Христов В.Г., Алфинцева Р.А. и др. *ЭОМ*. 2016, **52**(1), 13–21.
7. Nikolenko S.V. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011, **47**(3), 217–224.
8. Ryachin S.A., Burkov A.A. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2015, **51**(2), 118–124.
9. Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D., Syui N.A. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2015, **51**(1), 38–45.
10. Agafii V.I., Yurchenko V.A., Yurchenko V.I., Fomichev V.M. et al. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011, **47**(6), 488–492.
11. Крушенко Г.Г. *Труды научно-технической конференции. Ставеровские чтения*. Красноярск. Сибирский федеральный университет. КНЦ, 2009, 268–272.
12. Фурсов С.П., Парамонов А.М., Добында И.В., Семенчук А.В. *Источники питания для электроискрового легирования*. Кишинев: Штиинца, 1983.
13. Зайцев Е.А., Корниенко А.И., Покровский А.М. *ЭОМ*. 1971, (6), 72–75.
14. Wang P., Pan G., Zhou Y., Qu J. et al. *J Mater Eng Perform*. 1997, **6**(6), 780–784.
15. Ribalko A.V., Korkmaz K. and Sahin O. *Surf Coat Technol*. 2008, **202**, 3591–3599.
16. Бакал С.З., Фурсов С.П., Сафронов И.И., Белкин П.Н. *Известия АН МССР. Серия физико-технических и математических наук*. 1972, (2), 65–68.
17. Золотых Б.Н. *Физические основы электроискровой обработки металлов*. М.: Гостехиздат, 1953.
18. Любчик М.Я., Фурсов С.П. *ЭОМ*. 1970, (4), 77–81.
19. Парамонов А.М., Парамонов Д.А., Коваль А.В., Агафий В.И. *Источник тока для электрических процессов обработки*. Патент РМ № 3749. 2008.11.30, ВОПИ № 11/2008.
20. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электропроводящая обработка токопроводящих материалов*. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 184 с.
21. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х. *Труды ГОСНИТИ*. 2012, **109**(2), 127–139.
22. Парамонов А.М., Пасинковский Е.А., Коваль А.В. *ЭОМ*. 2006, (1), 22–27.
23. Верхотуров А.Д., Парамонов А.М., Бондарь В.Т. *Порошковая металлургия*. 1980. (7), 90–94.
24. Парамонов А.М., Фурсов С.П., Добында И.В. *Способ электроискрового легирования*. Авт. свид. SU № 656793. Бюл. изобр. и откр., 1979, № 14.
25. Парамонов А.М., Сафронов И.И., Семенчук А.В., Цуркан И.В. *ЭОМ*. 1997, (5–6), 28–32.
26. Паршутин В.В., Парамонов А.М., Коваль А.В., Агафий В.И. и др. *Способ получения многослойных покрытий методом электроискрового легирования*. Патент РМ № 685. 2013.10.31, ВОПИ № 10/2013.
27. Парамонов А.М., Парамонов Д.А., Коваль А.В., Агафий В.И. *Способ антикоррозийной обработки стали*. Патент РМ № 561. 2012.11.30, ВОПИ № 11/2012.

Summary

The paper presents the main schemes based on which installations for electrospark alloying have been and are being created. Schemes of generators of spark impulses from the first relaxation RC-generators to the separated semiconductor are considered. Ways of improvement of schemes and of characteristics of the received coverings are offered. It is shown that high-frequency processing considerably improves qualitative characteristics of the deposited layers.

Keywords: electrospark alloying, generators of spark impulses, power supplies, synchronization of generators, high-frequency alloying