

электроэрозионным легированием на мягких режимах. Затем зону с медным покрытием подвергли алмазному выглаживанию. Это обеспечивает резкое снижение износа гильз.

Подобный подход использовали для других пар деталей, работающих в условиях возвратно-поступательного движения, что обеспечивало повышение долговечности не менее, чем в два раза.

#### **Выводы**

Для снижения интенсивности усталостного изнашивания, являющегося следствием местного истощения ресурса пластичности, надо обеспечивать схемы взаимодействия, при которых преобладает упругопластический контакт металлических поверхностей и наносить двухслойные покрытия с сопротивлением сдвигу, близким к сопротивлению сдвигу основного металла, но с более высокой допустимой деформацией до разрушения. Более пластичный поверхностный слой надо наносить электроэрозионным легированием избирательно с последующей обработкой поверхностным пластическим деформированием.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Тимошенко В.А. Повышение ресурса деталей машин и технологической оснастки. Кишинев, 1995.
2. Крагельский И.В. Развитие науки о трении, износе и смазке твердых тел – трибоники // Словарь - справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев, 1979. С. 5-10.
3. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М., 1970.
4. Тимошенко В.А. Скольжение единичной неровности по деформируемой заготовке // Изв. АН МССР. Физика и техника. 1990. № 2. С. 44-47.
5. Тимошенко В.А. Пластическое взаимодействие деформируемой заготовки и выступов шероховатой поверхности инструмента // Трение и износ. 1994. Т.15. № 3. С. 440-445.

*Поступила 08.09.2000*

#### **Summary**

It is ground researches of legitimacies of surface plastic deforming and exhaustion of resource of a plasticity of metal at interplay of conjugated surfaces the route of increase of resistance to their fatigue failure are established.

---

А.В. Рыбалко\*, Д.М. Гричук\*, Orhan Sahin\*\*

## **ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ПО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ ОБРАБАТЫВАЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ**

*\*Институт прикладной физики АН РМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова,  
\*\*Institute of Technology, 141, Gebzel/Kocaeli, 4140, Turkey*

Непременным атрибутом установок для электроискрового легирования (ЭИЛ) являются электромагнитные вибраторы или другого типа устройства, осуществляющие периодическое контактирование обрабатываемого электрода с деталью [1]. При этом, либо при их сближении, либо в момент контактирования (зависит от типа использования генератора тока) формируется искровой канал. Как было показано ранее [2, 3], использование подобного типа систем коммутирования электрических разрядов оказывает существенное влияние на технологические показатели процесса ЭИЛ (при работе на режимах с энергией импульсов 0,5 Дж и ниже), в частности, снижает производительность. Напомним кратко основные факторы, определяющие потерю производительности установок подобного типа:

---

© Рыбалко А.В., Гричук Д.М., Sahin Orhan, Электронная обработка материалов, 2001, № 2, С. 16–21.

– уменьшение интегральной электрической мощности, выделяемой в межэлектродном промежутке за единицу времени по мере перехода к прецизионным режимам в связи с невозможностью компенсировать ее потерю повышением частоты следования импульсов (частота жестко задается вибратором и остается неизменной);

– уменьшение доли энергии, идущей на искровой разряд за время единичного импульса, в связи с шунтированием искрового канала соударяющимися электродами по мере их сближения после контакта; только часть импульса тока сопровождается искровым разрядом, остальная часть выделяется в короткозамкнутом контуре разрядной цепи генератора после металлического контакта электродов;

– уменьшение количества импульсов с наличием искрового разряда (увеличение количества импульсов при полном коротком замыкании электродов) из-за недостаточности величины электрической энергии в них для взрыва объема контактирующих микронеровностей электродов и последующего формирования искрового канала.

На наш взгляд, с целью раскрытия новых возможностей способа ЭИЛ, в частности, при проведении процесса в режиме с токами 20–30 А в амплитуде, необходимо отказаться от общепринятой концепции формирования искрового канала периодически соударяющимися электродами. Электродная система должна обеспечивать возможность подачи импульса в любой момент времени и при этом не шунтировать искровой канал при его развитии. Аналогом таких систем могут быть уже широко применяемые в практике ЭИЛ дисковые электроды с вращением, устройства с осевым вращением электродов и др. Как нам представляется, одно из устройств подобного типа может быть реализовано путем создания условий формирования искрового канала путем взрыва контактирующих микронеровностей электрода и детали при осцилляции (скольжении) обрабатываемого электрода по поверхности детали [4].

Данная работа посвящена экспериментальной проверке способа ЭИЛ при осцилляции электрода-анода вдоль обрабатываемой поверхности, при котором формирование искрового канала осуществлялось за счет взрыва контактирующих микронеровностей.

Движение обрабатываемого электрода по поверхности детали осуществляли с помощью типового вибратора от установки “ЭЛИТРОН-22А” с измененным электрододержателем. Осцилляция электрода осуществлялась по поверхности обрабатываемой детали, а не по нормали к ней. Частота вибрации 100 Гц, амплитуда вибрации поддерживалась постоянной в течение всех экспериментальных работ. Легированию подвергались образцы из стали У8. Каждая точка на кривых является результатом обсчета данных измерений, полученных при обработке как минимум трех образцов. Площадь обработки составляла 2 см<sup>2</sup>. Использовались обрабатывающие электроды из материала ВК8 сечением 8,8 мм<sup>2</sup>. Изменение массы электродов и образцов оценивалось с помощью аналитических весов АДВ – 200 М с точностью 0,0001 г. В целях снижения вклада субъективного фактора на полученные результаты при легировании образцов был изготовлен специальный стенд, на котором был смонтирован держатель вибрационного устройства с противовесом, а также механизм обеспечивающий автоматическое перемещение образца.

В качестве источника импульсного тока использовался лабораторный широкодиапазонный транзисторный генератор, обеспечивающий импульсы по форме, близкие к треугольной. В работе применялись три режима легирования с соответствующими энергиями в импульсах: первого режима – 0,035 Дж (длительность тока у основания 140 мкс, амплитуда тока – 75 А), второго режима – 0,23 Дж (длительность импульса у основания 220 мкс, амплитуда тока – 250 А). Потребляемая установкой мощность при легировании на втором и третьем режиме поддерживалась постоянной подбором частоты следования импульсов и составляла 150 Вт. На первом режиме такую мощность реализовать не удалось, поскольку для обеспечения заданной сплошности формируемого покрытия пришлось уменьшить сечение обрабатываемого электрода с 8,8 до 3,14 мм<sup>2</sup>. В данном случае эта мощность составила 100 Вт.

На рис. 1 представлены кривые, характеризующие убыль массы анода и привес массы детали (образца) для указанных режимов обработки. Здесь кривые 1э, 2э, 3э – убыль обрабатываемого электрода по режимам соответственно, кривые 1д, 2д, 3д – соответствующий им привес детали. Как видно, в описанных экспериментальных условиях перегиб в кривой привеса детали, характерный для процесса ЭИЛ [1], не наблюдается. При этом удельная производительность процесса нанесения, под которой будем понимать привес детали в единицу времени на единице площади и рассчитанной из данных, взятых на прямолинейном участке кривой (в нашем случае время 3 минуты), составляет для второго режима 8,7 мг/мин·см<sup>2</sup>, для третьего – 10,5 мг/мин·см<sup>2</sup>. И это при потребляемой мощности

150 Вт. Если взять для сравнения эти же данные для самого грубого режима установки “Элитрон – 22А” (установочная мощность по грубому режиму – 250 Вт, в более ранних установках и выше), то они составляют  $7,3 \text{ мг/мин} \cdot \text{см}^2$  [2].

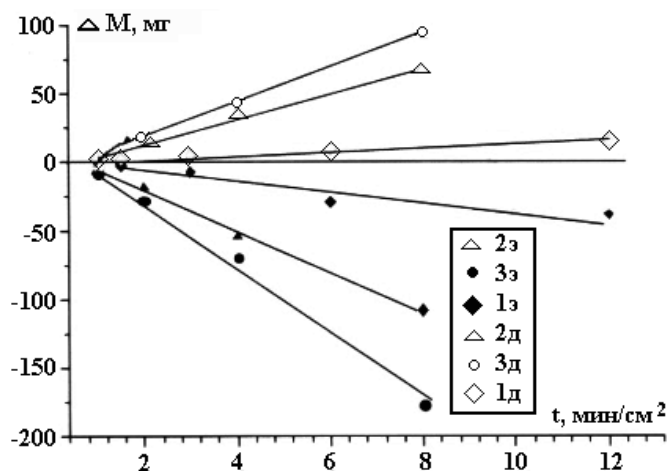


Рис. 1. Зависимость изменения масс обрабатывающего электрода (1э-3э) и детали (1д-3д) от времени обработки для различных электрических режимов электроискрового легирования.

Как видно из этого же рисунка, производительность для второго и третьего режимов обработки разная (у третьего режима – большая), несмотря на равенство затрачиваемой на процесс электрической мощности. Возможно, это связано с нелинейностью зависимости выброса массы электрода и величины энергии импульса. Для выравнивания производительности, необходимо по мере ухода в прецизионную область повышать мощность, идущую на процесс за счет увеличения частоты следования импульсов.

В соответствии с полученными данными достигнутая удельная производительность легирования на первом режиме составила  $1,4 \text{ мг/мин} \cdot \text{см}^2$ . Ее можно существенно повысить путем повышения частоты следования импульсов при одновременном увеличении сечения обрабатывающего электрода. Но целесообразность этого требует экспериментальной проверки в связи с трудностью обработки поверхности при большем соотношении площади сечения обрабатывающего электрода и площади эрозионного пятна от единичного импульса столь малой энергии.

В этой же работе проводилась обработка в более прецизионном режиме за счет снижения амплитудных значений тока до 30–20 А в импульсе при соответствующем уменьшении его длительности. Но при таких электрических параметрах импульса доля коротких замыканий в общем числе импульсов резко увеличилась, что связано с малой в условиях эксперимента скоростью нарастания тока в импульсе ( $2,5 \text{ А/мкс}$ ) и, соответственно, отсутствием условий для формирования искрового канала взрывом контактирующих микронеровностей; при такой скорости ввода энергии и за столь короткое время ее выделения не успевают взорваться контактирующие микронеровности. Впоследствии нам удалось решить эту проблему и довести производительность легирования до  $4,4 \text{ мг/мин} \cdot \text{см}^2$  и более. Существует реальная возможность формирования поверхности с шероховатостью по параметру  $R_a$  менее, чем 1 мкм. Такой технологический процесс крайне необходим при упрочнении деревообрабатывающего инструмента.

Оценивая производительность процесса ЭИЛ, нельзя не подчеркнуть данные о коэффициенте переноса материала, под которым понимается отношение величины массы, перенесенной на деталь, к величине убыли массы обрабатывающего электрода. При этом он подразделяется на абсолютный и относительный. Первый отражает отношение полученной к данному моменту за все время легирования массы детали к соответствующей убыли обрабатывающего электрода. Второй – отношение массы детали, полученной только за отрезок времени от предыдущего контроля масс к моменту текущего контроля к соответствующей убыли массы обрабатывающего электрода. На рис. 2 и 3 представлены зависимости, характеризующие изменение описанных коэффициентов переноса, рассчитанных из приведенных выше данных (рис. 1). Как видно, кривые обсуждаемых зависимостей для всех режимов легирования являются восходящими с наличием максимума. Сопоставив по времени эти участки кривых и ход кривых убыли массы обрабатывающего электрода из рис. 1, кривые 1э-3э, видим, что расход материала во времени при этом неизменный для каждого из

режимов легирования. Следовательно, в этом промежутке времени наряду с переносом материала с обрабатываемого электрода имеет место и эрозия материала детали, различная во времени для каждого из режимов легирования. Грубый режим даже имел отрицательный привес в первой контрольной точке, поэтому коэффициенты переноса для этой точки лишены смысла, что и отражено на графиках. В целом это говорит о недостоверности методики оценки эффективности процесса легирования на начальном его этапе с помощью коэффициентов переноса.

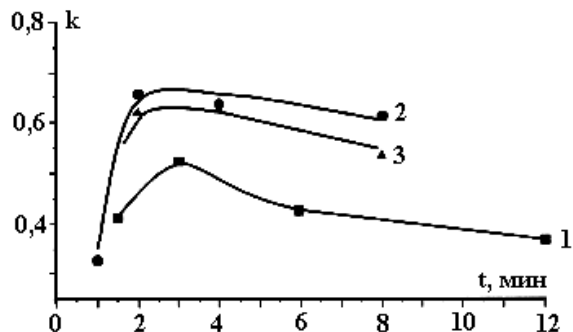


Рис. 2. Зависимость абсолютного коэффициента переноса материала электрода на деталь от времени обработки для различных электрических режимов электроискрового легирования. 1 – прецизионный; 2 – средний; 3 – грубый.

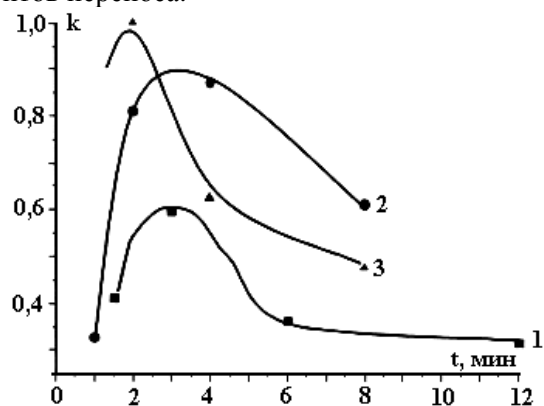


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента переноса материала электрода на деталь от времени обработки для различных электрических режимов электроискрового легирования. 1 – прецизионный; 2 – средний; 3 – грубый.

Оценивая ход кривых обоих рисунков, можно отметить, что зависимости изменения относительного коэффициента переноса во времени в большей степени отражают динамику переноса массы и поэтому, на наш взгляд, являются более информативными при отработке технологического процесса легирования. Так, из рис. 3 видно, что для грубого режима уже после второй минуты легирования количество перенесенного на деталь материала обрабатываемого электрода существенно падает. При этом кривая привеса (рис. 1) сохраняет линейный характер. Подобная картина, но для своих точек по времени, наблюдается на кривых и для остальных режимов. В свою очередь изменения абсолютного переноса материала обрабатываемого электрода на деталь (рис. 2) в меньшей степени отражают текущее состояние процесса переноса в связи с накопительным эффектом во времени. Причем на первом этапе занижается фактический перенос масс, а спустя определенное время (после максимумов на кривых рис. 3), эти данные завышаются, что создает иллюзию продолжения эффективного переноса массы.

Таким образом, по результатам анализа хода зависимостей рис. 3, можно ограничить удельное время легирования, которое на наш взгляд для описанных условий легирования не должно превышать 3–5 мин на квадратный сантиметр в зависимости от режима обработки.

Причина столь резкого снижения переноса эрозионной массы материала обрабатываемого электрода на деталь нами не выяснена. Как видно из рис. 1, и расход материала обрабатываемого электрода при этом остается неизменным. Можно предположить, что, в частности, для прецизионного режима невысокий коэффициент переноса может быть связан с большой амплитудой осцилляции обрабатываемого электрода, обеспечивающей уход пораженных искрой участков электродов друг от друга. Как результат, выброшенная масса материалов электродов может попасть на холодные участки их поверхностей и охладиться до порошка. Однако этот вопрос еще требует дополнительных исследований.

Следующая часть исследований касается изучения изменения шероховатости формируемых покрытий (параметра  $R_a$ ) во времени. Необходимость этих исследований вытекает из следующих соображений. Известно, что по мере осуществления процесса легирования, поверхностный слой непрерывно меняет свои физико-химические свойства; состав слоя может изменяться от материала подложки до близкого к материалу обрабатываемого электрода. В связи с этим формируемая шероховатость также должна меняться в силу изменения свойств слоя, что должно проявляться в различной величине размеров эрозионных лунок по мере смены сплава слоя, а значит – в различной его шероховатости.

Результаты исследований представлены на рис. 4. Каждая точка кривых – усредненное значение как минимум десяти измерений. Для грубого и, в меньшей степени, среднего режимов, в начальный момент времени легирования характерно увеличение шероховатости с максимумом приблизительно на четвертой минуте обработки. Затем величины значений шероховатости снижаются практически до исходного на начальный момент измерений. Для прецизионного режима легирования изменение параметра  $R_a$  практически несущественно.

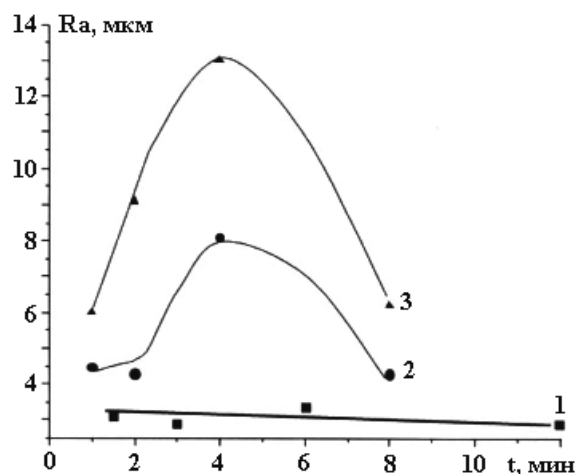


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности (параметр  $R_a$ ) от времени обработки при легировании в различных режимах. 1 – прецизионный; 2 – средний; 3 – грубый.

В порядке анализа полученных результатов можно сказать следующее. Увеличение шероховатости в течение обработки для грубых режимов в столь большом диапазоне значений  $R_a$  является естественным, но нежелательным технологическим фактором. Тем более, что это возрастание происходит именно, в том промежутке времени, который обычно является оптимальным для ЭИЛ.

Поскольку это нежелательное в большинстве случаев явление – характерное свойство самого способа легирования, необходим комплекс мероприятий по его устранению. Существуют различные методы снижения шероховатости. Более приемлемыми с точки зрения технологии являются методы снижения шероховатости при непосредственном проведении процесса легирования. Из них хотелось бы отметить следующие.

“Естественное” выглаживание шероховатости происходит при традиционном ЭИЛ с использованием вибраторов, осуществляющих соударение электрода и детали. Как показали наши исследования технологических возможностей установок, использующих подобного типа вибраторы, изменение шероховатости (подобно описанному выше) при легировании для каждого из режимов установки практически не проявляется во времени в связи с постоянным смятием микронеровностей соударяющимися электродами [2]. Причем изменения значений шероховатости при варьировании режимами (величиной энергии импульса) легирования от грубого (шестого) до прецизионного (третьего) также небольшое – от 5 до 3,3 мкм, соответственно. Естественно, чем выше при этом амплитуда тока питающего электромагнитную катушку вибратора, тем это смятие сильнее. Существенное влияние при этом оказывает и субъективный фактор – степень прижатия электрода оператором. Однако, как отмечалось в начале статьи, при этом данный способ контактирования электродов имеет и ряд недостатков, в частности, снижение производительности по мере перехода при обработке на мягкие и прецизионные режимы легирования.

Одним из возможных вариантов является одновременный, совмещенный процесс электроискрового нанесения и электроискрового выглаживания. Это достигается последовательной подачей импульсов тока, первый из которых обеспечивает нанесение покрытия, а последующий – выглаживание [5].

В заключение хотелось бы отметить следующее. Приведенные экспериментальные данные подтвердили возможность увеличения производительности, в том числе и при осуществлении легирования с малыми величинами электрической энергии импульсов, при использовании разновидности способа ЭИЛ со скользящим по поверхности детали обрабатывающим электродом. Перспективы этого увеличения пока полностью не раскрыты в связи с необходимостью подготовки специального оборудования. Помимо повышения производительности, эта разновидность способа ЭИЛ дает широ-

кую возможность изменять свойства обрабатываемых поверхностей путем варьирования электрическими параметрами импульсов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. М., Машиностроение, 1976.
2. Rybalko A.V., Hamurari V.I., Grichuk D.M. Perspectives of the productivity increase in electro-spark coating // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 1999. № 1. P. 10–13.
3. Рыбалко А.В., Гричук Д.М., Сомаараджа К.Р.С., Сахин Орхан. Некоторые особенности осуществления процесса электроискрового легирования на установках типа ЭЛИТРОН // Электронная обработка материалов. 2000. № 5. С. 133–139.
4. Pat. № 1414. Moldova. 2000. Procedeu de aplicare a acoperirilor prin electrodare. Rabalco Alexandru, Gricuc Dumitru, Ermilov Vladimir, Orhan Sahin.
5. Pat. № 1053. Moldova. 1998. Procedeu de aliere prin electrodare. Rabalco Alexandru, Gricuc Dumitru, Ermilov Vladimir, Mandru Dumitru.

Поступила 11.08.2000

#### Summary

The article reflects possibility of a heightening of productivity and improvement of quality of process ESA at usage of impulses with energy less than 0,5 J. In a bottom of the offered solution – waiving of conventional philosophy of forming of the spark channel encounter by a treating electrode and detail. The tendered electrode system ensures an opportunity of feeding of impulse at any moment of time, allows to implement requirements of forming of the spark channel by explosion of contacting asperities of adjoining electrodes were in continuous driving from each other (slide of a electrode on a detail) in one plane. The enumerated results of study productivity, roughness of formed coverages.

Е.К. Севидова, Л.И. Пупань, Ю.Я. Волков\*, В.Е. Стрельницкий\*, А.И. Тимошенко\*

### ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ КОРРОЗИОННО-ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА В ФИЗИОЛОГИЧЕСКОМ РАСТВОРЕ

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина*

*\*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина*

#### Введение

Алмазоподобные углеродные покрытия (АУП) наряду с уникальными физико-механическими свойствами отличаются высоким показателем биоинертности, что делает их привлекательными для применения на изделиях-имплантатах [1, 2]. Достоинства алмазоподобных углеродных покрытий как перспективного биосовместимого материала могут быть использованы в медицине только при наличии у них комплекса удовлетворительных эксплуатационных характеристик – высокой износостойкости, адгезии и коррозионной стойкости, а точнее – коррозионно-защитной способности. Последнее требование предполагает не только абсолютную коррозионную или химическую стойкость собственно субстрата пленки, но и минимальную ее пористость, сводящую к минимуму агрессивное воздействие жидкой физиологической среды на металлический материал основы имплантата – нержавеющие стали, титан и его сплавы и др. При выборе метода формирования АУП и оптимизации условий осаждения покрытия коррозионно-защитный эффект является одним из наиболее важных критериев.

© Севидова Е.К., Пупань Л.И., Волков Ю.Я., Стрельницкий В.Е., Тимошенко А.И., Электронная обработка материалов, 2001, № 2, С. 21–25.