

С.В. Коваленко, С.В. Николенко, А.Д. Верхотуров, В.С. Куценко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭИЛ ВРАЩАЮЩИМСЯ ТОРЦЕВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

*Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН
ул. Тихоооксанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия*

Введение

На эффективность процесса электроискрового легирования (ЭИЛ) [1, 2] влияет большое число факторов (механических, электрических, межэлектродной среды и др.), изменение которых в процессе работы механизированных установок способствуют изменению стабильности, технологических показателей процесса, снижению повторяемости получаемых результатов.

Если электрические параметры механизированных установок в целом достаточно разносторонне исследованы [3 – 6], то изучение влияния их механических параметров на формирование легированного слоя (ЛС), в частности, при использовании вращающегося торцевого электрода в качестве рабочего инструмента, носит разрозненный характер [7, 8].

При механизированном ЭИЛ цилиндрических деталей решающую роль играет правильный подбор скорости вращения легируемой детали и подачи легирующего электрода вдоль образующей поверхности детали.

Из данных [3] установлено, что каждый рабочий режим ЭИЛ имеет оптимальную линейную скорость, подачу и производительность процесса. Автором [3] найдены лучшие сочетания величин окружной скорости упрочняемой детали, продольной подачи электрода и его рационального охлаждения, осуществлена увязка этих величин с мощностью и возможной производительностью рабочих режимов электроискровых аппаратов. Задача решалась для сильноточных режимов генераторов импульсов с использованием в качестве электрода-инструмента электромагнитного вибратора.

Авторами [4] также проводились исследования технологических режимов «чистового» механизированного ЭИЛ с использованием электромагнитного вибратора, однако скорость вращения образцов неизвестного диаметра выражалась частотой их вращения, что затрудняет дальнейшее применение этих результатов на практике.

Предпринимались многочисленные попытки оптимизировать процесс ЭИЛ на механизированных установках с применением многоэлектродных головок [5], которые ввиду сложностей в их эксплуатации не нашли широкого применения.

В работе [9] Н.И. Лазаренко установлено, что равномерные по толщине и сплошности слои могут быть получены при смещении обрабатывающего электрода на 1/4 диаметра эрозионной лунки, что вызывает необходимость проводить процесс с определенной оптимальной скоростью перемещения анода вдоль обрабатываемой детали. Автором [10] при механизированном ЭИЛ вибрирующим электродом-инструментом была реализована идея продольного перемещения легирующего электрода на 1/4 его диаметра и определена оптимальная форма электрода – прямоугольник сечением 3–4 диаметра эрозионной лунки, предложена методика определения диаметра лунки по режиму обработки и температуре плавления материалов электродов.

Сказанное справедливо для вибрационного способа ЭИЛ. При безвибрационном ЭИЛ с использованием вращающегося торцевого электрода и следящей системы за поддержанием стабильного межэлектродного промежутка в разрядном контуре, распределение состоявшихся электроискровых

импульсов по поверхности катода носит случайный характер, связанный с неоднородностью и микронеровностью соприкасаемых поверхностей. На формирование легированного слоя существенное влияние оказывают, кроме того, чувствительность следящего устройства и частота вращения легирующего электрода [6, 8]. Но систематизированных данных по исследованию данного вопроса и технологических рекомендаций по проведению процесса легирования в литературе не обнаружено.

Поэтому представляет определенный интерес рассмотреть взаимосвязь и влияние механических параметров при ЭИЛ на созданной механизированной установке IMES-1001 с вращающимся торцевым электродом (МУВТЭ) на формирование и характеристики ЛС, чему и посвящена данная работа.

Методика

Исследовался процесс формирования ЛС и его свойства при ЭИЛ на МУВТЭ IMES-1001 с генератором импульсов Элитрон-22А.

В ходе экспериментов определено взаимное влияние параметров установки на формирование ЛС. Материалом подложки-катода выбрана широко применяемая углеродистая конструкционная сталь 35, материал электрода – стандартный твердый сплав ВК8. Размеры обрабатываемых образцов устанавливались исходя из соображения экономии материала и удобства проведения исследований. Диаметр обрабатываемой детали $d_{дет} = 12$ мм, длина обрабатываемой поверхности $l = 5,3$ мм, ее площадь $F = 2$ см².

Электрические параметры ЭИЛ во время проведения исследований постоянные. Настройка следящей системы за поддержанием постоянного межэлектродного промежутка производилась по максимально стабильному наибольшему значению рабочего тока для заданного режима в разрядном контуре. При использовании генератора импульсов Элитрон-22А на режиме 3 значение тока составляло $I_p = 1,3 \pm 0,2$ А.

На рис.1 приведена схема установки для механизированного электроискрового легирования торцевым вращающимся электродом.

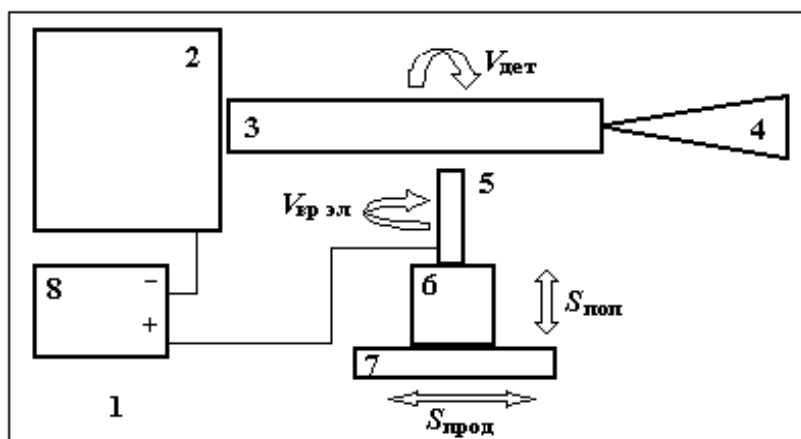


Рис. 1. Схема установки механизированного ЭИЛ IMES-1001: 1 – база токарного станка; 2 – изолированный кулачковый патрон; 3 – легируемая деталь; 4 – изолированная задняя бабка; 5 – торцевой вращающийся электрод; 6 – механизированная головка с суппортом станка; 7 – следящая система; 8 – генератор импульсов; $V_{вр.эл}$ – скорость вращения электрода; $V_{дет}$ – скорость вращения детали; $S_{поп}$ – поперечная подача; $S_{прод}$ – продольная подача

В процессе ЭИЛ определялось изменение массы катода и эрозия анода от удельного времени и других параметров легирования. Кроме того, проводились металлографические исследования поперечных срезов упрочняемых образцов. Эффективность процесса формирования ЛС и ЭИЛ рассчитывались по формулам $\gamma = \sum \Delta_k \cdot K \cdot t_x$ и $\gamma' = \sum \Delta_k \cdot K \cdot t_x K^{упр}$, где t_x – порог хрупкого разрушения ЛС, определяемый временем обработки, при котором впервые фиксируется отрицательный удельный привес катода Δ_k , K – средний коэффициент переноса, равный отношению Δ_k / Δ_a , (Δ_a – эрозия анода за каждую минуту легирования), $K^{упр}$ – коэффициент упрочнения, равный $K^{упр} = H_{\mu}^{ЛС} / H_{\mu}^{ОСН}$, где $H_{\mu}^{ЛС}$ и $H_{\mu}^{ОСН}$ – микротвердость ЛС и основы соответственно [2, 11].

Формирование ЛС ЭИЛ на МУВТЭ при прочих равных условиях зависит от взаимного влияния линейной скорости вращения легируемой детали, скоростей перемещения и вращения легирующего

щего электрода, работы следящей системы за поддержанием определенного межэлектродного промежутка, а также от энергетических параметров генератора электрических импульсов, состава окружающей среды и времени легирования, приведенного к единице обрабатываемой площади, то есть удельного времени обработки.

Ограничимся рассмотрением оптимальных механических параметров механизированной установки для ЭИЛ: линейная скорость вращения легируемой детали, продольная подача вращающегося торцевого электрода и скорость вращения последнего при определенном времени обработки. Узел следящей системы выполняет роль поперечной подачи электрода.

Из формулы определения линейной скорости:

$$V = \pi \cdot D \cdot n \text{ (мм/мин)}, \quad (1)$$

где D – диаметр легируемой детали (мм), n – скорость вращения шпинделя (легируемой детали) (об/мин) определим частоту вращения детали:

$$n = \frac{V}{\pi \cdot D} \text{ (об/мин)}. \quad (2)$$

Время, необходимое для обработки поверхности детали [12], определяется как:

$$T_m = \frac{L}{n \cdot S_{об}} \cdot i \text{ (мин)}, \quad (3)$$

где L – полная длина хода легирующего электрода, (мм), $S_{об}$ – подача за оборот вращения шпинделя (мм/оборот), i – число проходов, откуда

$$S_{об} = L/T_m \cdot n \text{ (мм/об)}. \quad (4)$$

Рассмотрим приведенные на рис.2 схемы обработки поверхностей тел вращения при механизированном ЭИЛ.

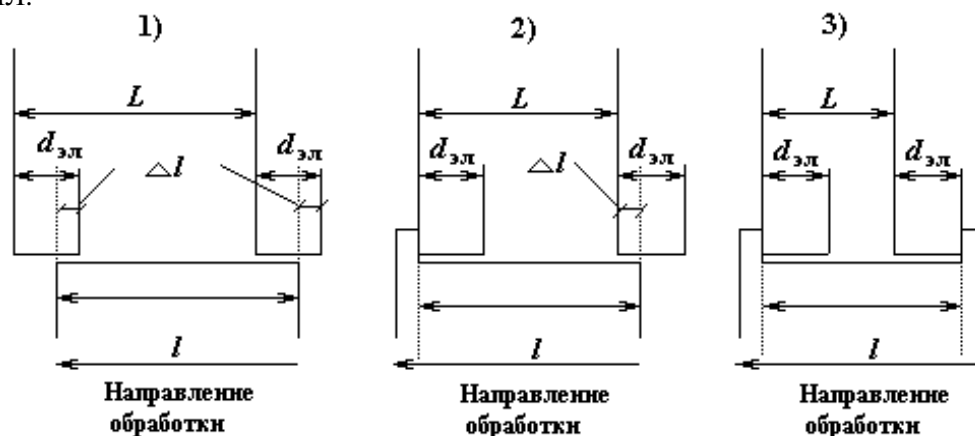


Рис. 2. Схемы обработки поверхностей тел вращения при механизированном ЭИЛ

1) Обработка детали на проход

$$T_m = \frac{l}{n \cdot S_{об}} \cdot i \text{ (мин)}. \quad (5)$$

2) Обработка детали до упора

$$T_m = \left(\frac{l}{n} + \frac{l - \Delta l}{n \cdot S_{об}} \right) \cdot i \text{ (мин)}, \quad (6)$$

где l/n – время за один оборот детали без подачи (мин).

3) Обработка детали, ограниченной двумя буртами или размерами

$$T_M = \left(\frac{l}{n} + \frac{l - d_{эл}}{n \cdot S_{об}} + \frac{l}{n} \right) \cdot i \text{ (мин)}. \quad (7)$$

Остановимся на первой схеме, так как наибольший интерес представляет время обработки заданной длины.

При обработке детали на проход при механизированном ЭИЛ из условий, обеспечивающих полную обработку ее поверхности без пропусков, выбирается некоторая величина захода электрода Δl , необходимая для предотвращения прижога кромок. Максимальное значение возможной величины пропуска будет при $0,5n$, то есть при $0,5S_{об \max}$. Следовательно, для покрытия поверхности детали без пропусков должно выполняться условие: $0,5S_{об \max} > \Delta l$, или $\Delta l < 0,5 S_{об \max}$ (мм).

Коэффициент перекрытия выбран экспериментально равным $K = 1,25$. При механизированном ЭИЛ максимально допустимую подачу $S_{об \max}$ принимаем с учетом выбранного коэффициента перекрытия K и диаметра вращающегося электрода $d_{эл}$, равного:

$$d_{эл} = K \cdot S_{об \max} \text{ (мм)}, \quad (8)$$

где $S_{об \max}$ – максимально возможная подача (мм/об).

$$S_{об \max} = \frac{d_{эл}}{K} = \frac{d_{эл}}{1,25} = 0,8 \cdot d_{эл} \text{ (мм/об)}, \quad (9)$$

следовательно, величина захода электрода $\Delta l < 0,5 \cdot S_{об \max}$ или $\Delta l < 0,4d_{эл}$.

Из выполнения этого условия выбираем

$$\Delta l = 0,25d_{эл} \text{ (мм)}. \quad (10)$$

Подача в минуту $S_{мин}$ и подача за оборот $S_{об}$ вращения шпинделя находятся в зависимости

$$S_{мин} = S_{об} \cdot n, \quad (11)$$

Для исследований процесса ЭИЛ с учетом известного опыта трудностей изготовления и эксплуатации вращающихся электродов малого диаметра выбран диаметр электрода 3 мм.

При механизированном ЭИЛ удельное время легирования ($t_{уд}$) рассматриваем за один проход. Тогда требуемая подача для ЭИЛ определится по формуле (4):

$$S_{об \text{ треб}} = L/T_{\text{треб}} \cdot n \text{ (мм/об)},$$

где $T_{\text{треб}}$ – требуемое время ЭИЛ данной детали (мин);

При обработке детали на проход при механизированном ЭИЛ: $L = 1$.

Рассмотрим взаимосвязь некоторых условий формирования ЛС на МУВТЭ.

1) Требуемое время ЭИЛ данной детали $T_{\text{треб}} = T_M$:

$$T_{\text{треб}} = \frac{l}{n \cdot S_{об \text{ треб}}} \text{ (мин)}. \quad (12)$$

2) Требуемая подача при ЭИЛ данной детали:

$$S_{об \text{ треб}} = \frac{l}{T_{\text{треб}} \cdot n} = \frac{l \cdot \pi \cdot D}{T_{\text{треб}} \cdot V} = \frac{F}{T_{\text{треб}} \cdot V} = \frac{1,0}{t_{уд} \cdot V} \text{ (мм/об)}, \quad (13)$$

где F – площадь легируемой поверхности (см^2); $t_{уд}$ – удельное время легирования (мин/см^2).

Таблица 1. Влияние механических параметров механизированной установки для ЭИЛ вращающимся торцевым электродом на формирование поверхностного слоя (IMES-1001 ($V = 7,5$ см/мин, $S_{об} = 1,33$ мм/об, $N_{эл} = 3000$ об/мин), Элитрон-22А ($I_p = 1,3$ А, $U_{xx} = 40$ В, $C = 360$ мкФ))
Катод – сталь 35, анод – ВК8

Число оборотов детали n , об/мин	Линейная скорость вращения детали V , см/мин	Удельное время ЭИЛ $t_{уд}$, мин/см ²	Суммарный привес катода, $\times 10^{-4}$ см ³	Суммарная эрозия анода, $\times 10^{-4}$ см	Сплошность ЛС, %	Толщина ЛС, мкм	Микротвердость ЛС, ГПа	Коэффициент упрочнения $K_{упр}$	Эффективность процесса, см ³ /мин	
									формирования ЛС $\gamma \cdot 10^{-4}$	ЭИЛ $\gamma' \cdot 10^{-4}$
<i>Влияние скорости вращения детали ($S_{об} = 1,33$ мм/об, $N_{эл} = 3000$ об/мин)</i>										
1	3,8	2	1,71	2,6	98	13	9,8	4,45	2,25	10,01
2	7,5	1	1,1	1,61	94	12	9,4	4,27	1,53	6,53
3	11,3	0,7	0,58	1,27	80	8	9,33	4,24	0,53	2,25
5	18,8	0,4	0,26	0,65	63	6	6,87	3,12	0,21	0,66
<i>Влияние продольной подачи электрода ($V = 7,5$ см/мин, $N_{эл} = 3000$ об/мин)</i>										
0,66	1,33	2,0	2,19	3,32	99	13	11,84	5,38	2,89	15,55
1,33	2,65	1,0	1,1	1,61	94	12	9,4	4,27	1,53	6,53
1,99	3,98	0,7	0,75	1,23	90	10	8,64	3,93	0,46	1,81
<i>Влияние скорости вращения электрода ($V = 7,5$ см/мин, $S_{об} = 1,33$ мм/об)</i>										
1500	0,86	1,13	1,0	0,76	94	10	9,2	4,18	0,65	2,72
3000	1,1	1,61	1,0	0,79	94	12	9,4	4,27	1,53	6,53
4500	1,44	1,8	1,0	0,8	95	14	10,6	4,82	2,3	11,09

Приведенные формулы выражают взаимозависимость скорости вращения детали и продольного перемещения легирующего электрода от времени обработки при указанном диаметре последнего. При выявлении наилучших показателей механических параметров априори определялась скорость вращения детали в диапазоне 1 – 5 об/мин при среднем значении продольного перемещения легиру-

ющего электрода. Средняя подача $S_{об} = 1,33$ мм/об, соответствующая удельному времени легирования $t_{уд} = 1$ мин/см², принималась из условия максимально возможной, равной из (9):

$$S_{об\ max} = \frac{d_{эл}}{K} = 0,8 \cdot d_{эл} = 2,4 \text{ (мм/об)}.$$

Частота вращения электрода $N = 3000$ об/мин выбрана согласно данным [6].

Критерием выбора наилучших механических параметров ЭИЛ являются сплошность, толщина, микротвердость ЛС при определенном удельном времени обработки.

Наилучшая продольная подача легирующего электрода при механизированном ЭИЛ (на один оборот детали) выбрана из $S_{об} = (0,66, 1,33, 1,99)$ мм/об, что соответствует перемещению электрода на $(0,22, 0,44, 0,66)$ его диаметра при оптимальной скорости вращения детали и удельном времени обработки $t_{уд} = (2,0; 1,0; 0,7)$ мин/см² заданной площади поверхности.

Наиболее оптимальная частота вращения электрода определялась в пределах ее изменения $N_{эл} = (1500, 3000, 4500)$ об/мин при найденных оптимальных значениях вращения детали и перемещения электрода.

Результаты

Анализ результатов исследований, приведенных в табл.1, показывает, что увеличение линейной скорости при ЭИЛ ведет к снижению качества легируемой поверхности, а чрезмерное уменьшение – к весьма длительному времени обработки, поэтому оптимальными являются скорость, равная 7,5 см/мин, и продольная подача $S_{об} = 1,33$ мм/об (перемещение на 0,44 диаметра электрода).

Наилучшие показатели толщины, твердости и сплошности полученного слоя достигнуты при частоте вращения легирующего электрода $N_{эл} = 4500$ об/мин. Это объясняется увеличением общего количества электрических разрядов (уровень среза > 10% амплитуды) при увеличении частоты вращения легирующего электрода. Данные проведенных исследований распределения разрядных импульсов тока по амплитуде в зависимости от частоты вращения легирующего электрода приведены в табл. 2.

Ступенчатый амплитудный анализ (через каждые 10% уровня) не выявил пропорциональной зависимости изменения количества импульсов каждой ступени от частоты вращения электрода, что объясняется случайным характером возникновения контактных площадок в связи с неоднородностью поверхностей легирующего электрода – анода и детали – катода, при котором время заряда и разряда накопительной емкости определяется размером и плотностью распределения микровыступов на электродах.

Таблица 2. Зависимость амплитуды импульсов электрического тока в разрядном контуре от частоты вращения легирующего электрода

Частота вращения электрода, об/мин	Уровень амплитуды импульса электрического тока в разрядном контуре									
	10-100%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	70-80%	80-90%	90-100%
	Среднее количество состоявшихся импульсов*, шт/мин									
	Длительность импульса $\tau = 150$ мкс, Амплитудное значение импульса разрядного тока $I_a = 120$ А, (100%)									
1500	23901	8443	209	306	2271	1939	880	1046	3436	2414
3000	30129	14623	545	2569	2031	1344	1572	787	4245	4370
4500	34131	17410	1185	767	806	1947	1115	1575	4479	4847

* Рассчитано при более чем 10 измерениях, величина среднего квадратического отклонения не превышает $\pm 8\%$.

Для извлечения более полной информации из опытных данных о зависимости выходных параметров (толщина ЛС, его сплошность и микротвердость) от входных (линейная скорость вращения детали, продольная подача легирующего электрода и частота его вращения) при различном удельном времени легирования были использованы регрессионные уравнения для каждого выходного параметра.

Обработка результатов привела к построению карт зависимостей входных и выходных параметров при механизированном ЭИЛ по линиям уровней (рис. 3). Их совместное рассмотрение позволяет найти приемлемое решение задачи оптимизации для формирования измененного поверхностного слоя с заданными параметрами – его толщиной, сплошностью и твердостью при соответствующем удельном времени обработки. Эти зависимости позволяют дать технологические рекомендации для механизированного ЭИЛ вращающимся торцевым электродом.

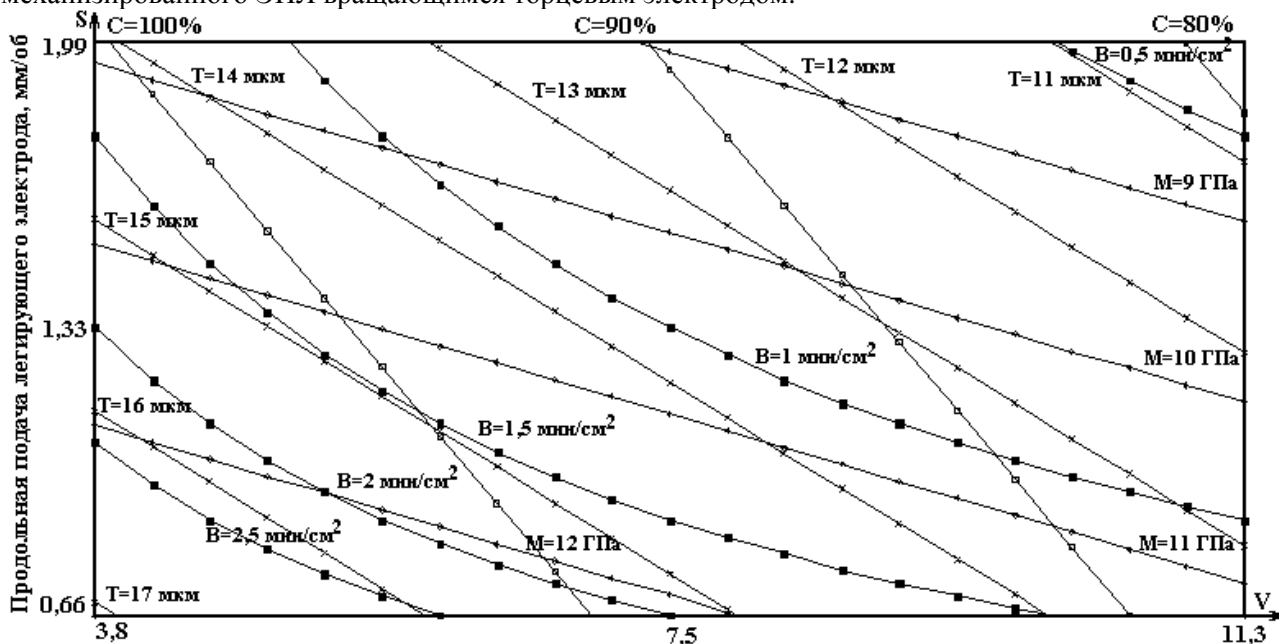


Рис. 3. Карта зависимостей входных и выходных параметров при механизированном ЭИЛ (Сталь35-ВК8)

Отмечено значительное влияние скорости и длительности легирования на процесс формирования поверхностного слоя: с увеличением скорости вращения детали и пропорциональному ей уменьшению удельного времени легирования происходит уменьшение привеса катода, эрозии анода и эффективности процесса.

Выводы

1. Установлено, что при механизированном ЭИЛ вращающимся торцевым электродом процесс формирования поверхностного слоя зависит от числа оборотов вращения легируемой детали, продольного перемещения электрода, частоты его вращения и их взаимного влияния.

2. Показано, что при увеличении числа оборотов детали n до 5 отмечено ухудшение показателей сплошности, толщины и микротвердости слоя. Наибольший коэффициент упрочнения (4,08) получен при $n = 1$, а наименьший (2,86) – при $n = 5$. Эффективность формирования ЛС в данном диапазоне изменяется более чем в 10 раз.

3. При изменении продольной подачи от $S_{об} = 0,66$ мм/об до 1,99 мм/об уменьшаются сплошность, толщина, микротвердость поверхностного слоя, а также коэффициент его упрочнения. Эффективность формирования ЛС при этом значительно уменьшается.

4. При частоте вращения легирующего электрода $N_{эл}$ (1500, 3000, 4500 об/мин) отмечено увеличение толщины и микротвердости ЛС при постоянном удельном времени легирования.

5. При использовании генератора импульсов Элитрон-22А максимально эффективное формирование ЛС при ЭИЛ вращающимся торцевым электродом $\varnothing 3$ мм возможно при линейной скорости вращения детали 7,5 – 10 см/мин, продольном перемещении электрода 1,33 мм/об (0,4 – 0,5 его диаметра) и частоте вращения электрода – 3000 – 4500 об/мин. При выборе оптимальных механических условий формирования ЛС механизированного ЭИЛ необходимо учитывать удельное время обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р. Электроискровое легирование металлических поверхностей. //Электронная обработка материалов. 1977. № 3. С.12 – 16.
2. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток, 1995.
3. Иванов Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. М., 1961.

4. Петров Ю.Н., Дехтярь Л.И., Сафронов И.И. Влияние технологических режимов механизированного ЭИЛ на качество получаемой поверхности // Электронная обработка материалов. 1965. № 3. С. 45–49.
5. Коваль Н.П., Зайцев Е.А., Иванов В.И., Верхотуров А.Д. Влияние режимов обработки на формирование упроченного слоя при механизированном электроискровом легировании // Электронная обработка материалов. 1975. № 3. С. 24 – 27.
6. Ливурдов В.И., Снежков В.А., Панайотов С.И. и др. Электрические характеристики установки для ЭИЛ типа ELFA. // Электронная обработка материалов. 1986. № 2. С. 31 – 35.
7. Антонов Б.Т. Способ и устройство для локального нанесения покрытий вращающимся электродом. Авт. свид. НРБ №168017. Электротехника и энергетика. 1978. 5Н113П.
8. Верхотуров А.Д., Кириленко С.Н., Горбунов Ю.А. Особенности ЭИЛ на механизированной установке // Электронная обработка материалов. 1982. № 2. С. 18.
9. Лазаренко Н.И. О механизации образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. 1965. № 1. С. 24 – 27.
10. Разумов В.П., Еган О.М. Некоторые особенности механизации процесса ЭИЛ // Электронная обработка материалов. 1977. № 4. С. 22 – 24.
11. Николенко С.В. Создание новых электродных материалов с использованием минерального сырья и самофлюсующихся добавок для электроискрового легирования инструментальных и конструкционных сталей. Автореферат. Хабаровск, 1996.
12. Сысоев В.И. Основы резания металлов и режущий инструмент. М., 1962.

Поступила 28.08.02

Summary

In the work the basic parameters of mechanized electrospark alloying (ESA) on installation "«IMES-1001" equipped with a one-electrode head with a rotating face electrode has been determined. The influence of mechanical parameters of the unit on formation of the changed superficial layer has been investigated. The received data can render the essential help in creation of new generation of installations for mechanized electrospark alloying and high technologies, and also creation of special electrode materials.

А.И. Михайлюк

УМЕНЬШЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ ГРАФИТОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

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

Использование электроискрового легирования (ЭИЛ) для повышения износостойкости поверхностей трения часто ведет к увеличению шероховатости, которая согласно практическим данным, в зависимости от условий трения, не должна превышать $R_a = 0,32 - 2$ мкм [1]. При этом существует ряд деталей, поверхности трения которых из-за конструктивных особенностей не всегда возможно довести до требуемой шероховатости апробированными способами: шлифованием, поверхностно-пластической деформацией и т.п.

Из практики ЭИЛ замечено, что электроискровая обработка поверхности графитовым электродом практически не изменяет ее шероховатости, а иногда даже уменьшает ее [2].

В связи с этим целесообразно исследовать возможности ЭИЛ графитом для уменьшения шероховатости поверхностей, сформированных предварительной электроискровой обработкой другими электродными материалами.