

УДК 621.793.7

*С. А. ЛУЗАН*, канд. техн. наук, доц. ХНАДУ, Харьков;  
*О. М. ГОРБАЧЕВСКАЯ*, асп. ХНАДУ

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАССОПЕРЕНОСА АНОДА ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ

Установлены зависимости массопереносов различных материалов электродов при электроискровом легировании стальной поверхности от длительности обработки. Получена математическая модель массопереноса электрода при электроискровом легировании.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, деталь, поверхность, электрод, анод, катод, массоперенос, покрытие.

**Введение.** Надежность восстановленных деталей во многом зависит от качества напыляемых покрытий: износостойкости, уровня остаточных напряжений в покрытии, пористости, прочности сцепления с основой. Последняя зависит от качества подготовки напыляемой поверхности и в большей степени от её шероховатости. На основании анализа технических характеристик основных методов, применяемых для обработки поверхностей перед напылением газопламенных покрытий, можно сделать вывод, что электроискровое легирование (ЭИЛ) выгодно отличается от других способов. Поскольку ЭИЛ является экологически чистым методом, позволяет управлять прочностью сцепления покрытия с основой не только за счет повышения шероховатости, но и путем изменения химического состава приповерхностного слоя при использовании различных материалов в качестве электрода. Кроме того, метод позволяет обрабатывать поверхности с твердостью HRC>40, и в отличие от методов механической обработки может применяться для деталей различной формы и размеров, что является необходимым при восстановительном ремонте деталей машин. Для получения требуемой шероховатости восстанавливаемой поверхности, с целью обеспечения необходимой прочности сцепления покрытия с деталью, необходимо установить зависимости массопереноса электродов из различных материалов от времени обработки и соответственно величины шероховатости, создаваемой на обрабатываемой поверхности.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Ученые А.Д. Верхотуров, Г.В. Самсонов, Б.Р. Лазаренко отмечают, что характер процесса электроискрового легирования определяется свойствами электродных материалов, а именно их эрозионной стойкостью [1, 2, 3]. Количественно привес катода связан с величиной эрозии анода. При ЭИЛ для отдельных групп материалов отмечаются корреляционные связи между привесом катода и теплофизическими свойствами материала анода. Установлено, что в общем случае при ЭИЛ (особенно на “грубых режимах”,  $I_{к.з.} > 5$  А) наблюдается зависимость эрозионной стойкости материалов электродов от особенностей их электронного строения. Анализ этого вопроса с точки зрения электронного строения материалов выполнен в работах [2, 4].

Интенсивность переноса материала анода на катод при прочих равных условиях зависит как от свойств материалов электродов, так и от длительности обработки. При этом динамика формирования поверхностных слоев на катоде характеризуется тем, что интенсивность переноса материала анода на катод максимальная в первые моменты

© С.А. Лузан, О.М. Горбачевская, 2012

проведения процесса, при последующей обработке – уменьшается. В конечном итоге при определённых значениях энергии разряда перенос сменяется эрозией уже нанесенного слоя – привес катода становится отрицательным. Протекание конкурирующих процессов формирования и разрушения слоев при преобладании последнего с увеличением времени обработки приводит к ограничению толщины формируемого слоя. Однако возможен также механизм ЭИЛ при котором на первом этапе обработки происходит интенсивная эрозия катода, затем этот процесс уменьшается и дальнейшее легирование уже ведет к повышению привеса катода (легирование титана металлами группы железа – Fe, Ni, Co). В подобном случае в процессе обработки на поверхности катода возникает своеобразный «подслой», на который в последующем идет перенос материала анода [5].

Учитывая большое число факторов, влияющих на процесс ЭИЛ, наиболее достоверные количественные данные возможно получить только экспериментальным путем для конкретных условий обработки.

**Цель и постановка задачи.** Целью настоящей работы является определение зависимостей массопереносов различных материалов электродов на стальную поверхность детали от времени обработки.

**Исследование электроискрового легирования стали 45 различными электродами.** Электроискровое легирование производили на воздухе при температуре 20 °С с использованием специализированной установки «Элитрон-50» на жестком режиме: рабочее напряжение на электродах  $V = 80-90$  В, сила тока короткого замыкания  $I_{к.з.} = 5-10$  А. Обработка осуществлялась вибрирующим электродом вручную, скорость перемещения электрода не превышала 0,07-0,09 м/мин.

В качестве катода (К) использовали образцы из стали 45 ГОСТ 1050-88 с шероховатостью поверхности  $Ra = 3,2$  мкм. Для анодов (А) применяли сталь конструкционную легированную марки 25ХГТ ГОСТ 4543-71, сталь конструкционную углеродистую марки Ст2кп ГОСТ 380 - 2005, сталь инструментальную быстрорежущую марки Р6М5 ГОСТ 19265 – 73, нихром марки Х20Н80 ГОСТ 10994-74, медь марки М16 ДСТУ ГОСТ 859-2001. Химический состав электродов приведен в таблице 1.

Количество перенесенного материала электрода-анода  $\Delta m$  за время  $t$  определяли расчетным методом по выражению:

$$\Delta m = m_{обр.} - m_{исх.}, \quad (1)$$

где  $m_{обр.}$  и  $m_{исх.}$  – соответственно масса обработанных образцов и исходная; определяли взвешиванием на лабораторных весах Axis AD 500, с точностью до 0,001 г.

Массоперенос материала электрода-анода определяли как удельный привес катода  $G_k$  по формуле:

$$G_k = \Delta m / F, \quad (2)$$

где  $F$  – площадь обработанной поверхности образца.

Шероховатость поверхностей исследуемых образцов исследовали на профилографе-профилометре TR-200 соединенным с ПК, обеспечивающим регистрацию и сохранение результатов измерений. Погрешность измерения среднего

арифметического абсолютных значений отклонений профиля  $Ra$  составляла  $\leq 10\%$ , диапазон измерения – 0,01-40 мкм.

Таблица 1 – Химический состав электродов-анодов

| Химический состав, % | Марка электрода |           |          |               |                    |
|----------------------|-----------------|-----------|----------|---------------|--------------------|
|                      | Сталь 25ХГТ     | Ст2кп     | Р6М5     | Нихром Х20Н80 | Медь М1б           |
| C                    | 0,22-0,29       | 0,09-0,15 | 0,82-0,9 | 0,03          | -                  |
| Si                   | 0,17-0,37       | До 0,05   | 0,2-0,5  | 1,0-1,5       | -                  |
| Mn                   | 0,8-1,1         | 0,25-0,5  | 0,2-0,5  | До 0,6        | -                  |
| Ni                   | До 0,3          | До 0,3    | До 0,6   | остальное     | До 0,002           |
| S                    | До 0,035        | До 0,05   | До 0,025 | До 0,015      | До 0,004           |
| P                    | До 0,035        | До 0,04   | До 0,03  | До 0,02       | До 0,002           |
| Cr                   | 1-1,3           | До 0,3    | 3,8-4,4  | 20,0-23,0     | -                  |
| N                    | -               | До 0,008  | -        | -             | -                  |
| Ti                   | 0,03-0,09       | -         | -        | До 0,2        | -                  |
| Cu                   | До 0,3          | До 0,3    | До 0,25  | -             | 99,95*             |
| As                   | -               | До 0,08   | -        | -             | До 0,002           |
| Mo                   | -               | -         | 4,8-5,3  | -             | -                  |
| W                    | -               | -         | 5,5-6,5  | -             | -                  |
| V                    | -               | -         | 1,7-2,1  | -             | -                  |
| Co                   | -               | -         | До 0,5   | -             | -                  |
| Al                   | -               | -         | -        | До 0,2        | -                  |
| Fe                   | -               | -         | -        | До 1,0        | До 0,004           |
| Pb                   | -               | -         | -        | -             | До 0,004           |
| Zn                   | -               | -         | -        | -             | До 0,003           |
| O                    | -               | -         | -        | -             | До 0,003           |
| Sb                   | -               | -         | -        | -             | До 0,002           |
| Bi                   | -               | -         | -        | -             | До 0,001           |
| Sn                   | -               | -         | -        | -             | До 0,002           |
| Остальные элементы   | -               | -         | -        | Zr 0,2-0,5    | *Cu + Ag min 99.95 |

Дополнительно определяли следующие параметры: высоту неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$ , средний шаг неровностей профиля  $Sm$  и относительную опорную длину профиля  $t_p$  [ДСТУ 2413-94]. По результатам измерений нашли средние значения параметров шероховатости и внесли их в таблицу (табл. 2). Определяемые характеристики отображались в цифровом и графическом виде (рис. 1).

Таблица 2 – Результаты измерения шероховатости

| № п/п           | $Ra^{cp}$ , (мкм) | $Rz^{cp}$ , (мкм) | $Sm^{cp}$ ,(мм) | $t_{50}^{cp}$ , (%) |
|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| 1 – Ст2кп       | 5,105             | 22,292            | 0,360           | 63,625              |
| 2 – Медь М1б    | 6,726             | 27,276            | 0,402           | 79,967              |
| 3 – Р6М5        | 8,257             | 32,151            | 0,431           | 90,233              |
| 4 – Сталь 25ХГТ | 6,376             | 27,692            | 0,395           | 68,467              |
| 5 – Х20Н80      | 4,481             | 23,193            | 0,296           | 73,333              |

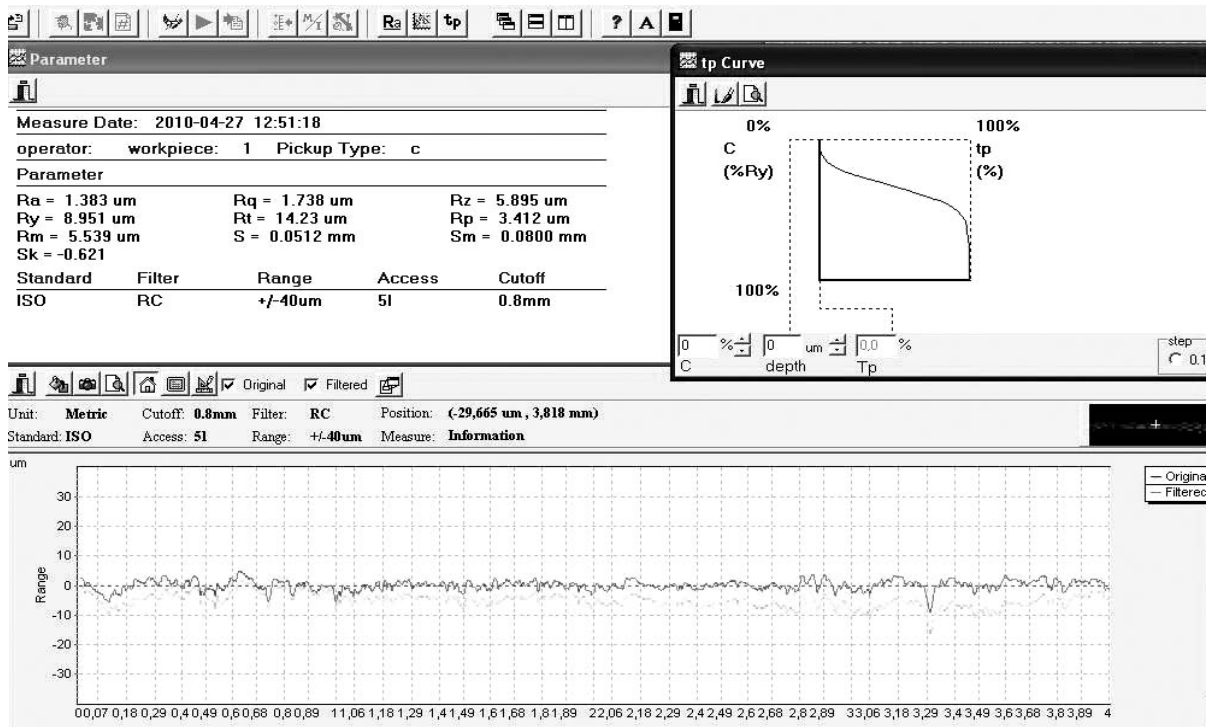
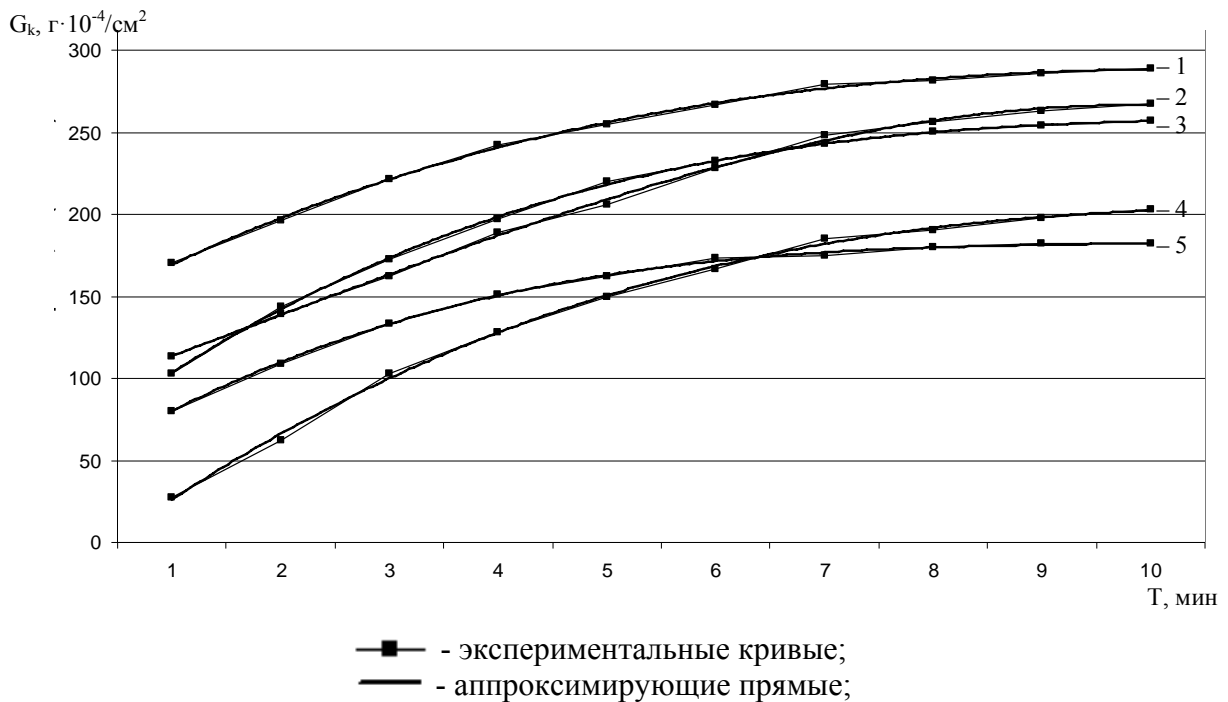


Рисунок 1 – Отображение результатов измерения шероховатости на дисплее ПК (электрод – нихром Х20Н80)

**Результаты исследования.** На рис. 2 представлены зависимости массопереносов электродов-анодов из различных материалов при легировании стали 45 от длительности обработки.



1 – Ст2кп; 2 – Сталь 25ХГТ; 3 – Медь М16; 4 – Нихром Х20Н80; 5 – Р6М5  
Рисунок 2 – Массоперенос материала анода при легировании стали 45

После аппроксимации экспериментальных кривых получаем уравнения, представляющие полиномиальные функции третьей степени:

$$G_{к1} = 0,0672t^3 - 2,7582t^2 + 36,123t + 136,16; \quad (3)$$

$$G_{к2} = -0,1277t^3 + 0,6669t^2 + 23,825t + 89,487; \quad (4)$$

$$G_{к3} = 0,1234t^3 - 4,294t^2 + 50,593t + 57,184; \quad (5)$$

$$G_{к4} = 0,0878t^3 - 3,7132t^2 + 50,696t - 20,893; \quad (6)$$

$$G_{к5} = 0,1466t^3 - 4,2204t^2 + 41,543t + 42,647. \quad (7)$$

Коэффициенты корреляции составляют:  $R_1 = 0,9991$ ;  $R_2 = 0,9989$ ;  $R_3 = 0,9996$ ;  $R_4 = 0,9987$ ;  $R_5 = 0,9989$ . Выражения (1, 2, 3, 4, 5) являются математическими моделями, устанавливающими зависимость привеса катода – основы из стали 45 в зависимости от длительности электроискрового легирования.

Общая математическая модель массопереноса электрода при электроискровом легировании имеет следующий вид:

$$G_{общ.} = At^3 - Bt^2 + Ct + D, \quad (8)$$

где  $A, B, C, D$  – коэффициенты, которые определяются материалом электрода – анода.

Анализируя экспериментальные данные можно сделать вывод о том, что характер переноса материала анода на катод – стальную поверхность для разных материалов электродов аналогичен. На первых 2-4-х минутах легирования происходит наиболее интенсивный привес массы катода, при достижении времени обработки 6-8 мин наступает стабилизация массопереноса, поскольку возникает процесс эрозии катода. Величины массопереноса для исследованных материалов анода расположены в следующем порядке: максимальная у электрода из Ст2кп, затем стали 25ХГТ, меди М16, нихрома Х20Н80, стали инструментальной быстрорежущей Р6М5. Аналогичный характер массопереносов для материалов с различными физико-химическими свойствами указывает на превалирующую роль в процессе формирования поверхностных слоев физических явлений, обусловленных импульсным разрядом (эрозии, полярного переноса, термического напряжения).

Шероховатость поверхности после электроискрового легирования составляет  $Ra = 6...7$  мкм, что удовлетворяет требованиям для напыления газопламенных покрытий. Таким образом, метод ЭИЛ может успешно применяться при подготовке поверхностей деталей машин перед напылением восстановительных покрытий как альтернативный струйно-абразивной обработке.

**Выводы**

1. Установлены зависимости массопереносов электродов из Ст2кп, стали 25ХГТ, меди М16, никрома Х20Н80, стали инструментальной быстрорежущей Р6М5 при электроискровом легировании стальной поверхности от длительности обработки.
2. Определено, что характер переноса материала анода на катод – стальную поверхность для разных материалов электродов аналогичен, интенсивность переноса материалов анода на деталь-катод максимальна в течение 2-4 минут обработки и при достижении времени обработки 6-8 мин стабилизируется.
3. Электроискровое легирование позволяет создавать шероховатость на обрабатываемой поверхности равную  $Ra = 6...7$  мкм, что удовлетворяет требованиям для напыления газопламенных покрытий.

**Список литературы:** 1. *Верхотуров А.Д.* Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. – К.: Техника, 1982. – 181 с. 2. *Самсонов Г.В.* Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г.В. Самсонов, А.Д. Верхотуров, Г.А. Бовкун, В.С. Сычев. – Киев: наукова думка, 1976. – 219 с. 3. *Лазоренко Н.И.* Электроискровое легирование металлических поверхностей. – М.: Машиностроение, 1976. – 292 с. 4. *Верхотуров А.Д.* Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А.Д. Верхотуров, И.М. Муха. – Киев: Техника, 1982. – 131 с. 5. *Гитлевич А.Е.* Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Царканский, В.М. Ревуцкий. – Кишинев: Штиинца, 1985 г. – 196 с.

*Поступила в редколлегию 20.11.2012*

УДК 621.793.7

**Определение зависимости массопереноса анода при электроискровом легировании стальной поверхности от времени обработки / С.А. Лузан, О.М. Горбачевская//** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2012. – № 60 (966). – С. 53–58. – Бібліогр.: 5 назв.

Встановлено залежності масопереносів різних матеріалів електродів при електроіскровому легуванні сталевій поверхні від тривалості обробки. Отримано математичну модель масопереносу електрода при електроіскровому легуванні.

**Ключові слова:** електроіскрове легування, деталь, поверхня, електрод, анод, катод, масоперенос, покриття.

Dependences of various materials weight transfer at an electrospark alloying of a steel surface from processing duration are established. The mathematical model of an electrode weight transfer at an electrospark alloying is received.

**Key words:** electrospark alloying, detail, surface, electrode, anode, cathode, transfer of weight, coating.