

жидкость марки МХО-69. Проводились исследования влияния СОЖ на основные характеристики процесса резания: коэффициент трения, силы резания, коэффициент усадки стружки. Обработка осуществлялась на чистовых режимах.

Полимерсодержащая СОЖ облегчает пластическую деформацию (рис.1, г) и разрушение чугуна: наблюдается снижение коэффициента усадки стружки, изменяется характер стружкообразования. Так как пластическая деформация при отделении стружки в среде МХО-69 концентрируется в более тонком поверхностном слое, по сравнению с обработкой без СОЖ, и имеет более низкие значения, то это способствует диспергированию стружки, что улучшает условия её удаления из зоны контакта. При использовании СОЖ МХО-69 изменяется также характер протекания контактных процессов, которые характеризуются в полной мере коэффициентом трения. При обработке с СОЖ наблюдается его значительное снижение (рис.1, д). СОЖ заполняет все углубления между неровностями на передней грани резца, образуя гладкую поверхность, представляющую собой гидравлическую опору для сходящей стружки. Жидкость является граничным слоем между контактной поверхностью стружки и передней гранью резца. Сила сопротивления перемещению стружки по резцу при смазке определяется не только свойствами контактной поверхности стружки, а ещё и свойствами смазывающего вещества (трение при смазке в процессе резания представляет собой по существу полужидкостное трение). Процесс трения на передней грани резца можно рассматривать как непрерывный процесс пластической деформации металла в зоне трения, а силу трения считать сопротивлением сдвигу, величина которого определяется свойствами деформируемого металла в этой зоне и площадью контакта стружки с резцом. Введение в зону резания полимерсодержащей СОЖ приводит к уменьшению силы резания, степени пластической деформации металла в зоне сдвига (уменьшению усадки стружки), площади контакта стружки с передней гранью резца. Изменение этих факторов приводит к увеличению нормальных удельных давлений на передней поверхности. Если представить коэффициент трения как отношение касательного и нормального напряжений, то увеличение нормального удельного давления неизменно ведёт к уменьшению коэффициента трения. Исследования передней поверхности резца из твёрдого сплава ВК8 после точения чугуна в среде МХО-69 не выявили наличия застойной зоны на резце. Наличие смазки между контактной поверхностью стружки и передней гранью резца устраняет полностью или частично влияние сил адгезии, т.е. процессы наростообразования.

Применение полимерсодержащей СОЖ влияет на характеристики процесса резания (снижает уровень значений усадки, сил резания, коэффициента трения), тем самым снижается роль неоднородности как основного фактора обрабатываемости. Применение полимерсодержащей жидкости так же приводит к изменению параметров шероховатости. Это связано с уменьшением уровня значений сил резания, температуры и коэффициента трения. Особенно наглядно это проявляется при обработке чугунов твёрдыми сплавами. Применение СОЖ позволило повысить обрабатываемость высокопрочного чугуна, например скорость резания, в 1,4 раза (табл. 1) и снизить высоту неровностей (табл. 1).

Таблица 1

Материал инструмента и марка СОЖ	Чугун твёрдостью 210-220 НВ		Чугун твёрдостью 470-480 НВ	
	Скорость резания, м/с	Шероховатость, $R_a$ , мкм	Скорость резания, м/с	Шероховатость, $R_a$ , мкм
ВК8	1,5	2,7	0,7	4,0
Обработка ВК8 с СОЖ МХО-69	2,1	1,6	1,0	3,0

### Литература

1. Чугун: Справочное издание / Под ред. Шермана А. Д. И Жукова А. А. - М.: Металлургия, 1991. - 576с.
2. Лалазарова Н.А. Влияние неоднородности высокопрочного чугуна на его обрабатываемость резанием // Вестник ХГАДТУ. – 2000. №12-13. С. 86-87.
3. Устрехова О.А. Активизация процессов механической обработки металлов в результате действия полимерсодержащих сред: Дис... канд. техн. наук.-Львов, 1981. – 127с.

УДК 621.793.

## НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЭИО ЭЛЕКТРОДАМИ С РАЗЛИЧНЫМ СОСТАВОМ

Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Науменко А.А., Мартыненко А.Д.

(г. Харьков, Украина)

*In article the electro- spark processing of parts repairation by electrodes with the different carbon and chrome concentration is considered. Graphic and mathematical solutions of anode erosion and additional weight of cathode at ESP are led.*

Одним из перспективных методов восстановления деталей машин из углеродистых, низколегированных и легированных материалов является метод электроискровой обработки (ЭИО), который обеспечивает наращивание изношенного слоя до 1,0мм (90% деталей имеют такой износ) и не изменяет линейных размеров и качество сердцевины предварительно упрочненных деталей. Поскольку в существующей практике длинномерные детали чаще всего восстанавливают железнением или хромированием, то поиск эффективного материала анода ограничили теми же сплавами, из

которых изготовлены детали, а также хромистыми – относительно не дефицитными в сравнении с твердыми сплавами, например – Т15К6, при этом учитывали требования к твердости покрытий деталей, работающих в сопряжении.

Выбор материала электрода [1, 2] неразрывно связан с материалом восстанавливаемой детали и требованиями, предъявляемыми к ней. При этом существенное влияние оказывает химический состав анода, который определяет эксплуатационные показатели (уровень физико-механических свойств, износостойкость, склонность к выкрашиванию, прочность сцепления нанесенного слоя с металлом восстановленной детали). Учитывая это,

рассмотрели взаимосвязь суммарного привеса катода - детали ( $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$ ) от энергии импульса обработки и материала анода - электрода. Для исследований выбраны сплавы на основе железа с различным содержанием углерода и хрома (табл. 1), которые применяют для изготовления деталей машин.

Обработку проводили по двум режимам:  $E=0,9$ Дж;  $E=3,4$ Дж. Установлено, что с увеличением энергии импульсов  $E_1 \rightarrow E_2$  привес катода возрастает для всех трех групп исследуемых материалов (углеродистых сталей, высокоуглеродистых сплавов и легированной стали - см. табл. 1).

Из приведенных данных видно, что суммарная эрозия анода и привес катода при ЭИО имеют тенденцию к увеличению в материалах, у которых температура плавления ниже (сходственная температура обработки выше), и в большей мере интенсифицируются процессы диффузии.

В низкоуглеродистых легированных сталях  $\sum_{j=1}^n \Delta a$  и  $\sum_{j=1}^n \Delta k$  самые низкие, в углеродистых выше и наиболее высокие показатели соответствуют заэвтектидным сталям и чугунам. Рост этих показателей более существенный при минимальных значениях энергии импульса  $E=0,9$ Дж, когда в прогрев восстанавливаемого слоя при обработке существенный вклад вносит температура плавления обрабатываемого материала.

Таблица 1.

Суммарная эрозия анода и привес катода при ЭИО различных материалов электродом с содержанием 17,0% Cr и 1,0%С (сплав 100X17) при количестве проходов  $n=3$

Материал катода	Привес катода, $\sum_{j=1}^n \Delta k \times 10^{-2}, \text{г/см}^2$	Эрозия анода, $\sum_{j=1}^n \Delta a \times 10^{-2}, \text{г/см}^2$	Энергия импульса, Е, Дж
Углеродистые стали:			
Ст.3,	0,5	1,5	0,9
	1,2	3,0	3,4
Сталь 45	0,5	1,5	0,9
	1,2	3,0	3,4
Сталь 40X	0,6	1,5	0,9
	1,2	3,0	3,4
Заэвтектидная сталь:			
ШХ-15	0,6	1,7	0,9
	1,3	3,1	3,4
Чугуны:			
Серый чугун	0,6	1,8	0,9
	1,3	3,2	3,4
Легированный чугун	0,6	1,9	0,9
	1,3	3,2	3,4
Легированная сталь:			
20X1M1Ф1ТР	0,5	1,4	0,9
	1,2	2,9	3,4

При этом повышение  $\sum_{j=1}^n \Delta a$  не превышает 20%, а – величины  $\sum_{j=1}^n \Delta k$  достигает ~36%. Обработка с энергией

импульса  $E=3,4$ Дж в меньшей мере влияет на  $\sum_{j=1}^n \Delta a$  (увеличение не превышает 8,3%) и  $\sum_{j=1}^n \Delta k$  (увеличение не превышает 10,3%) при использовании различных материалов. С увеличением энергии импульса от 0,9 до 3,4Дж привес катода в зависимости от обрабатываемого материала возрастает в 2,0–2,4раза, эрозия анода в 1,68–2,07 раза.

Известно, что наиболее качественный наращиваемый слой достигается при условии, когда используются одинаковые материалы для анода и катода (коэффициенты линейного расширения равны).

При электроискровом наращивании металла перенос вещества с анода на катод происходит в жидкой и газообразной фазах, поэтому процесс не является стабильным и можно ожидать формирование различных фаз, доля которых будет существенно изменяться даже на отдельных участках покрытия детали. В связи с этим структуру и фазовый состав материала анода не изучали. Для оценки структурообразования и качества покры-

тия провели комплексные исследования с использованием современных методик, подробно рассмотренных во второй главе данной работы.

Было признано целесообразным оценить эффективность и качество покрытий из хромистых и твердых сплавов. Для исследований в качестве анода были выбраны легированные сплавы, которые обеспечивают высокую износостойкость, и приведены в табл. 2.

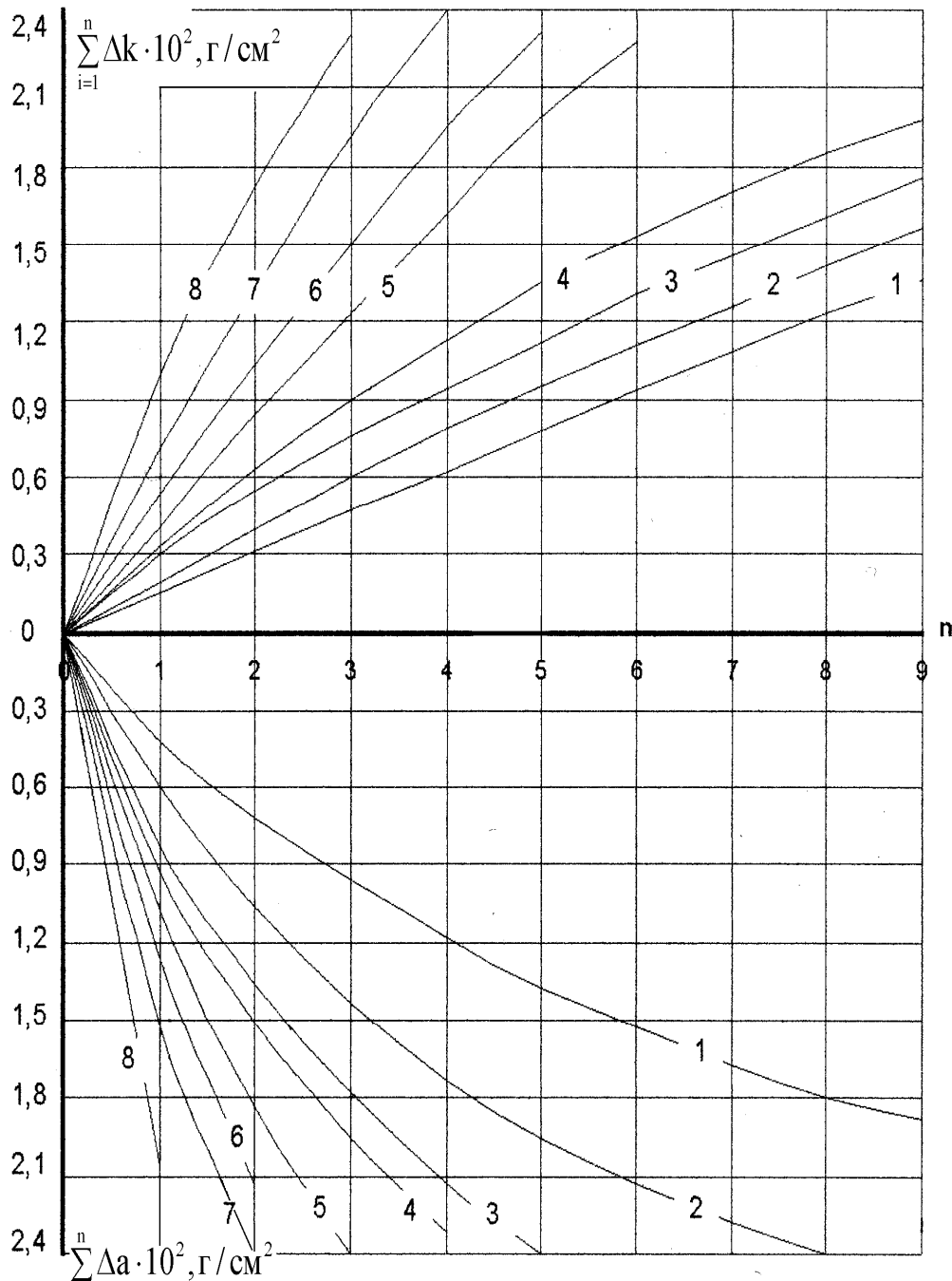


Рис. 1. Изменение массопереноса при фиксированной концентрации углерода (1,5%) и различном содержании хрома: 1, 3, 5, 7 - при  $E=0,9\text{Дж}$ ; 2, 4, 6, 8- при  $E=3,4\text{Дж}$ ; образец 10- кривые 1, 2 (30% Cr); образец 7- кривые 3, 4 (20% Cr); образец 11- кривые 5, 6 (15% Cr); образец 9- кривые 7, 8 (10% Cr).

Хромистые сплавы отличаются содержанием (в широких пределах) хрома и углерода. Такой набор материалов выбран для того, чтобы оценить роль карбидообразования, возможность формирования различных упрочняющих фаз при нанесении покрытий. При разработке оптимальных параметров наращиваемого слоя, очень важно знать не только влияние каждого фактора в отдельности, но и – совместное. Известно, что в ряде случаев взаимное влияние может оказаться более значимым, чем роль каждого фактора в отдельности.

Для изучения явления массопереноса и связи между параметрами были определены зависимости суммарной эрозии анода -  $\sum_{j=1}^n \Delta a$  и привеса катода -  $\sum_{j=1}^n \Delta k$  после ЭИО. Полученные зависимости приведены на рис. 1 и 2.

Таблица 2.

Специально изготовленные хромистые сплавы, использованные в качестве анода при ЭИО

Номер сплава	Содержание компонентов, %	
	C	Cr
1	2,5	30,0
2	0,5	10,0
3	2,5	10,0
4	0,5	30,0
5	0,5	15,7
6	1,0	17,3
7	1,5	20,0
8	2,0	20,0
9	1,5	10,0
10	1,5	30,0
11	1,5	15,7
12	1,0	30,0

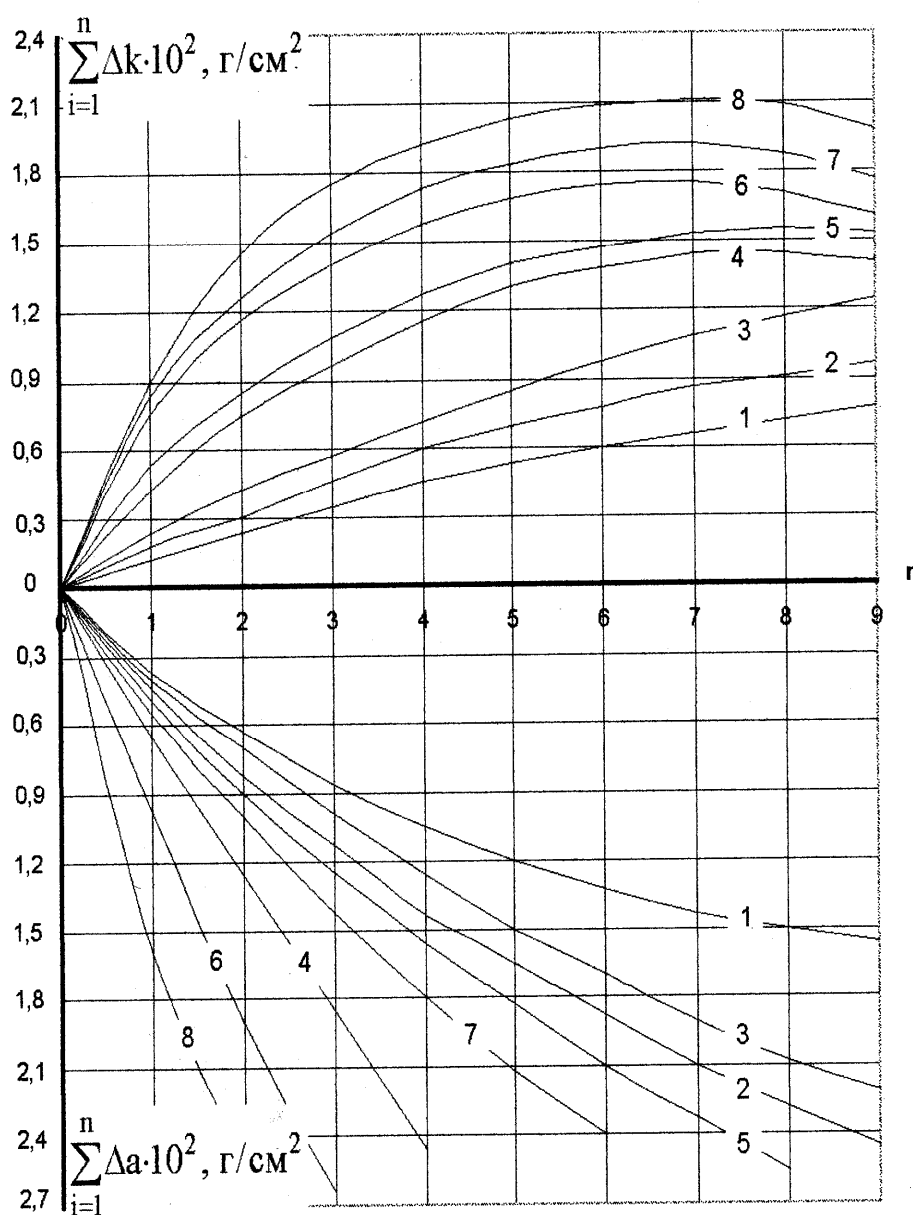


Рис. 2. Изменение массопереноса при фиксированной концентрации хрома (30,0%) и различном содержании углерода: 1, 3, 5, 7- при  $E=0,9 \text{ Дж}$ ; 2, 4, 6, 8- при  $E=3,4 \text{ Дж}$ ; образец 4 - кривые 1, 2; образец 12 - кривые 3, 4; образец 10- кривые 5, 6; образец 1 - кривые 7, 8.

При фиксированном значении содержания углерода, равном 1,5%, получили (см. рис. 1), что с увеличением энер-

гии импульса при обработке привес катода существенно возрастает, однако в большей мере для материалов с пониженной концентрацией хрома.

При фиксированном значении хрома, равном 30,0% (см. рис. 2) и различном содержании углерода с увеличением энергии импульса обработки возрастают привес катода и эрозия анода, аналогично зависимостям, приведенным на рис. 1. Вместе с тем необходимо отметить, что эрозия анода и привес катода возрастают с повышением концентрации углерода при одинаковых значениях числа проходов электрода и энергии импульса обработки.

С увеличением концентрации углерода возрастает доля хрупкой карбидной фазы, что способствует интенсивному росту эрозии анода [3]. На основании этих исследований подтверждается, что и в этом случае массоперенос металла с анода на катод определяется материалом анода, числом проходов электрода и энергией импульса.

Для установления зависимости влияния рассмотренных факторов использовали метод планирования эксперимента.

В качестве основных факторов были выбраны следующие: концентрация углерода - ( $X_1$ ) и хрома - ( $X_2$ ) в металле анода; энергия импульса,  $E$  - ( $X_3$ ); число проходов электрода,  $n$  - ( $X_4$ ). Каждому фактору присваивали два кодированных значения:

Для расчета математической модели (1) был принят план эксперимента  $2^4$  (1/2 реплики), в качестве параметра оптимизации принят привес катода  $\Sigma \Delta k$  ( $Y$ ), г/см<sup>2</sup>. Проверка полиномиальной модели показала, что она адекватна. Незначимым оказался только фактор парного взаимодействия  $X_1 \times X_2$  ( $Cr \times C$ ). Полученная математическая модель имеет вид:

$$Y = 0,84 - 0,38X_1 - 0,18X_2 + 0,83X_3 + 0,73X_4 - 0,48X_1X_3 - 0,33X_2X_3 + 0,32X_4X_3 - 0,12X_1X_4 - 0,12X_2X_4 + 0,62X_1X_2X_3 + 0,52X_1X_2X_4 - 0,48X_1X_3X_4 - 0,28X_2X_3X_4 + 0,28X_1X_2X_3X_4 \quad (1)$$

Максимальный прирост привеса катода достигается при энергии импульса и числе проходов на верхнем пределе значений, а также при концентрации углерода и хрома в аноде на - нижнем. При анализе парных взаимодействий видно, что углерод и хром не оказывают влияния на привес катода, однако их роль значительно проявляется при совместном взаимодействии с технологическими параметрами обработки -  $E$  и  $n$ . В этом случае становится мало значимым уровень концентрации этих химических элементов. Поэтому может оказаться эффективным и использование не только хромистых сплавов, содержащих углерод и хром, но и - феррохрома.

Исследованиями установлено, что качество и свойства покрытия определяются не только массопереносом, но и структурой, фазовым составом, уровнем напряжений, плотностью (пористостью) и однородностью, наличием дефектов (микротрещин).

Важная роль в формировании качества слоя принадлежит числу проходов обрабатывающего электрода. Выявлена закономерность, свидетельствующая о том, что с увеличением числа проходов обрабатывающего электрода возрастает микропористость покрытия. Кроме того, при 1-3 проходах формируется дисперсная структура на базе химических элементов катода и анода.

С увеличением числа проходов обрабатывающего электрода доля химических элементов катода в слое практически отсутствует, и начинают кристаллизоваться оксидные фазы, а также увеличивается количество скоагулированных и обособившихся карбидных включений (рис. 3).

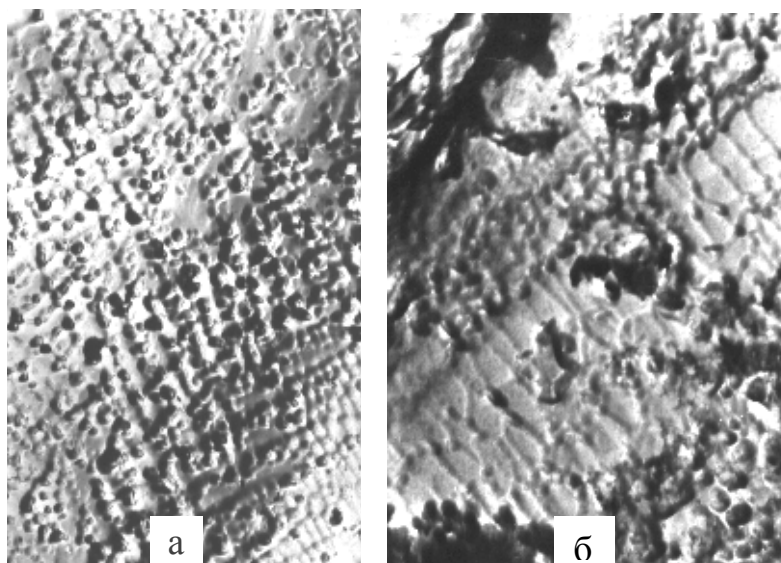


Рис. 3. Микроструктура покрытия ( $\times 3700$ ): а - 1 проход электрода; б - 6 проходов электрода.

Появление последних связано с увеличением в слое доли карбидообразующего элемента из анода и уменьшением матричной фазы катода. Рост микропор, количества кристаллизуемых оксидных фаз на поверхности

слоя особенно четко просматривается после трех проходов при  $E=3,4$  Дж. В этом случае за счет разложения оксидных фаз при последующих проходах электрода формируются поры, что приводит к охрупчиванию покрытия. При формировании слоя с числом проходов более трех проявляется кристаллизация неоднородной структуры.

Исходя из результатов и анализа выборки ( $\approx 300$  значений привеса катода) с использованием ЭВМ было получено уравнение регрессии (2), отражающее зависимость суммарного привеса катода  $\sum \Delta k$  (Y), г/см<sup>2</sup> от концентрации основных и легирующих элементов анода и параметров обработки - энергии импульса  $E$ , и числа проходов электрода -  $n$  с коэффициентом корреляции  $R \geq 0,9$ .

$$\sum \Delta k = 1,11 \frac{\sqrt{C \times E_u}}{Cr^2} \times n - 0,02 \frac{E_u \times \sqrt{C}}{Cr} \times n^2 \quad (2)$$

где  $C$ ,  $Cr$  - соответственно содержание углерода и хрома в материале электрода, мас.%;  $E_u$  - энергия импульса обработки, Дж;  $n$  - количество проходов электродом при обработке.

В конечном итоге величина  $\sum \Delta k$  (Y) позволяет оценить толщину наносимого покрытия  $h$  (3):

$$h = \frac{\beta \times \sum \Delta k}{\rho} \quad (3)$$

где  $\beta$  - поправочный коэффициент, учитывающий несплошность покрытия, а также наличие пор и шероховатости,  $\beta \geq 0,78$  при  $n=1$ ,  $\beta=0,89$  при  $n=2$ ,  $\beta=0,97$  при  $n=3$ ,  $\rho$  - удельный вес материала обрабатываемого электрода, г/см<sup>3</sup>.

Как показали исследования (рис. 1 и рис. 2), использование в качестве электродов материалов с содержанием углерода 1,5-2,5% и хрома 10,0-15,0% не целесообразно выбирать число проходов электрода более 2-3<sup>х</sup>. При таком ограничении обеспечивается достаточный привес катода. Чем выше концентрация углерода и хрома, тем раньше проявляется эффект "предельного слоя".

Испытания на износ образцов с нанесенным покрытием и без него показали, что в нелегированных углеродистых материалах потеря веса практически не отличается от исходных образцов (за исключением серого чугуна, который при обработке отбеливается). Наиболее высокая износостойкость в покрытии достигается при использовании в качестве анода высокоуглеродистых или низкоуглеродистых легированных материалов. В табл. 3 приведены результаты испытаний на износ.

Таблица 3.

Результаты испытания образцов на износ с покрытием

Материал покрытия	Число циклов испытания	Нагрузка, кг	Масса образца, г		Изменение массы, г	Износ (по сравнению со сталью Ст.3)
			начальная	конечная		
Ст.3	10 <sup>6</sup>	60,0	76,36	73,91	2,45	1,0
Сталь 40X	10 <sup>6</sup>	60,0	78,41	76,68	1,73	0,71 (0,72)*
Сталь ШХ15	10 <sup>6</sup>	60,0	69,94	69,62	0,32	0,13 (0,44)
Сталь 20X1M1Ф1ТР	10 <sup>6</sup>	60,0	68,88	68,63	0,25	0,10 (0,49)
Легированный сплав (100X17)	10 <sup>6</sup>	60,0	74,39	74,22	0,17	0,07 (0,23)
Чугун серый	10 <sup>6</sup>	60,0	79,13	78,06	1,07	0,44 (0,75)

Примечание: \*-данные таблицы - средние значения из 8-10 испытаний, - в скобках представлены данные испытания образцов на износ без покрытия

Из анализа приведенных экспериментальных данных видно, что при нанесении покрытий из сталей Ст.3, 40X целесообразно использовать в качестве анода легированные материалы, особенно с повышенным содержанием хрома, которые помимо увеличения износостойкости обеспечивают и высокие показатели жаростойкости и коррозионной стойкости, малую склонность к графитизации и повреждаемости.

Исходя из данных (табл. 3) средняя износостойкость, оцененная по потере веса, указывает на наиболее высокие показатели для образцов из легированных и нелегированных высокоуглеродистых сплавов (ШХ15, легированный сплав, серый чугун), на которые нанесено покрытие электродами из таких же материалов.

Как показали исследования и результаты анализа априорной информации, наибольший прирост износостойкости достигается при нанесении покрытий из легированных материалов. Анод из таких материалов отличается и повышенной эрозийной стойкостью. Выполненные исследования микроструктуры подтвердили, что в процессе трения и изнашивания на рабочей поверхности развиваются процессы пластической деформации, которые вызывают перестройку дислокационной структуры, снижают температуру фазовых переходов и интенсифицируют диффузионные процессы [4 - 6].

**Выводы.** 1. Исследованиями установлено, что с увеличением энергии импульса от  $E=0,9$  Дж до  $E=3,4$  Дж привес катода возрастает в 2,0 - 2,4 раза, а эрозия анода - в 1,68 - 2,07 раза. При этом суммарная эрозия анода и

привес катода при ЭИО в случае если они изготавливаются из одного материала имеют тенденцию к увеличению в сплавах с наиболее высокой сходственной температурой. 2. Наиболее качественный, хотя и наименьший по величине слой покрытия при ЭИО высокоуглеродистых сплавов формируется при обработке с энергией импульса  $E=0,9$ Дж. Высокая эрозионная стойкость анода достигается при использовании для него легированных сплавов. 3. Испытаниями на износ подтверждена целесообразность применения в качестве материала анода высоколегированных сплавов, особенно с повышенным содержанием хрома.

Однако в этих сплавах концентрация углерода не должна быть слишком высокой, т.к. выделяющееся большое количество карбидной фазы приводит к неоднородному износу из-за склонности ее к повреждаемости и разрушению (выкрашиванию).

Неоднородность изнашивания может вызываться и увеличением склонности покрытия к графитизации карбидной фазы.

Максимальный прирост привеса катода достигается при влиянии каждого фактора в отдельности: энергия импульса  $E=3,4$ Дж; число проходов  $n=6$ ; концентрация хрома - 10% и углерода - 0,5%.

Оценивая парные взаимодействия установили, что углерод и хром в аноде совместно не оказывают влияния на привес катода, однако их роль проявляется в сочетании с технологическими факторами.

### Литература

1. Электродные материалы для электроискрового легирования. /Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. - М.: Наука, 1988. - 224с.
2. Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р. Электроискровое легирование металлических поверхностей // Электронная обработка материалов.
3. Мартыненко А.Д., Скобло Т.С., Сидашенко А.И. Исследование влияния химического состава анода на величину и качество слоя, восстановленного электроискровым методом. // Сб. науч. тр.: Повышение надежности восстанавливаемых деталей машин: - Харьков: ХГТУСХ, 1997. – С.75-81.
4. Влияние химического состава и пластической деформации на склонность к графитизации высокоуглеродистых сплавов / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Мартыненко А.Д. и др. // Сб. науч. тр.: Повышение надежности восстанавливаемых деталей машин. – Харьков: ХГТУСХ, 1996. - С.56-62.
5. Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов. / Скобло Т.С., Воронцов Н.М., Рудюк С.И. и др. - М.: Металлургия, 1994. - 336с.
6. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. - М.: Металлургия, 1976. - 176с.