

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТЕХНОЛОГИЯМИ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

В. Б. Тарельник, д.т.н., профессор
М. Ю. Думанчук, ст. преподаватель
Сумский национальный аграрный университет

Представлены результаты исследований комбинированных электроэрозионных покрытий (КЭП) поверхностных слоев стальных и никелевых образцов. КЭП, сформированные из твердых износостойких и мягких антифрикционных металлов, позволят в значительной мере повысить надежность и долговечность ответственных деталей при изготовлении и ремонте машин.

Ключевые слова: качество поверхности, микротвердость, шероховатость, толщина слоя, электроэрозионное легирование, комбинированные электроэрозионные покрытия

Постановка проблемы в общем виде. Большинство ответственных деталей компрессоров, насосов, газоперекачивающих аппаратов и другого промышленного оборудования, работают при высоких скоростях, нагрузках и температурах, а также в условиях абразивного, коррозионного и других видов воздействия рабочих сред.

Разрушение детали начинается, как правило, с поверхности, поэтому от ее качества зависит стойкость к износу. С каждым годом технологами всех стран все большее внимание уделяется созданию новых композиционных материалов типа «основа – покрытие», объединяющих защитные свойства покрытий с механической прочностью основы.

Предлагаемые специалистами трибологами новые технологические решения позволяют в разы сэкономить энергоресурсы, как за счет применения менее энергоемких технологий в области упрочнения этих деталей, так и путем повышения надежности и долговечности промышленного оборудования.

Таким образом, работы, посвященные повышению качества поверхностей ответственных деталей промышленного оборудования, актуальны и своевременны.

Анализ последних исследований и публикаций. Наиболее распространенной причиной нарушения работоспособности деталей и рабочих органов машин является не поломка, а износ и повреждение их рабочих поверхностей [1].

Качество поверхности деталей машин определяется геометрическими характеристиками и физико-механическими свойствами поверхностного слоя. Основными геометрическими характеристиками качества поверхностного слоя являются: шероховатость поверхности, волнистость и отклонение от правильной геометрической формы. К основным физико-механическим характеристикам качества относятся: структура поверхностного слоя, микротвердость, наличие и знак остаточных напряжений [2].

Метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), используемый для повышения качества

поверхностей деталей, является одним из наиболее простых и доступных. Среди его достоинств, таких, как локальность, малый расход энергии, отсутствие объемного нагрева материала, следует отметить простоту автоматизации, «встраиваемости» в технологический процесс изготовления деталей и совмещения операций [3].

Совершенствованию технологии ЭЭЛ уделяется большое внимание, как на Украине, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья. Оно направлено в основном на повышение качественных характеристик формируемых слоев.

В процессе ЭЭЛ на поверхности анода и катода образуется слой измененной структуры, который при воздействии на него травителей, используемых для выявления микроструктуры материалов электродов, остается "белым", т.е. структура его не выявляется. Подобные слои наблюдались на поверхностях материалов, подвергавшихся шлифованию, точению, фрезерованию, электромеханической обработке, обработке дробью, на поверхностях трения после воздействия высококонцентрированных потоков энергии. Твердость такого слоя, как правило, значительно превосходит твердость материалов электродов. В нем действуют напряжения, превосходящие внутренние напряжения в электродных материалах анода и катода [4, 5].

Несмотря на неоспоримые достоинства, метод ЭЭЛ имеет и ряд недостатков (увеличение шероховатости, возникновение в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, снижение усталостной прочности, ограничение толщины формируемого слоя), которые нередко ограничивают его применение для более широкого круга деталей машин [6, 7, 8-11].

Одним из способов устранения выше названных недостатков ЭЭЛ могут быть многослойные электроэрозионные покрытия.

Известны способы, заключающиеся в нанесении двух и более слоев [12, 13]. Так, целью метода, представленного [12], является повышение производительности процесса за счет увеличения коэффициента переноса

материала при нанесении покрытий из твердых сплавов, для чего на поверхности детали формируют промежуточный слой из поверхностно-активного металла (ПАМ). В качестве ПАМ могут быть использованы любые известные поверхностно-активные металлы (например, эвтектики Sn-Zn, Cd-Zn, легкоплавкий металл - Sn). Покрытия с использованием ПАМ обладают повышенной адгезионной прочностью, что особенно важно для деталей, работающих при знакопеременных циклических нагрузках.

В литературе практически отсутствуют сведения о структурообразовании поверхностного слоя при нанесении (многослойных) ЭЭЛ покрытий, сочетающих в себе твердые износостойкие и мягкие антифрикционные материалы.

Таким образом, многослойные (комбинированные) электроэрозионные покрытия (КЭП), с помощью которых возможно формировать поверхностный слой детали с требуемыми свойствами, являются резервом повышения качества поверхностных слоев деталей.

Формулирование целей статьи. Целью работы является обеспечение требуемого качества поверхностных слоев ответственных деталей машин путем формирования квазимногослойных комбинированных электроэрозионных покрытий (КЭП) из твердых износостойких и мягких антифрикционных металлов, что позволяет в значительной мере повысить их надежность и долговечность при изготовлении и ремонте машин.

Изложение основного материала исследований.

Методика исследований

К КЭП относятся: комбинированные «двухслойные» и квазимногослойные покрытия, состоящие из твердых износостойких и мягких антифрикционных материалов, нанесенные в различной последовательности;

Для проведения экспериментальных работ от каждой из IV-VI групп IV, VI и VIII рядов периодической системы таблицы Менделеева были выбраны представители: титан (Ti), ванадий (V), вольфрам (W) и их карбиды, а также твердые сплавы BK8, T15K6 и хром. В качестве легкоплавких металлов использовались: кадмий (Cd), индий (In), олово (Sn), сурьма (Sb) и свинец (Pb) и медь (Cu). Применение в качестве основного покрытия циркония, гафния, тантала, (металлов IV и V рядов IV, V групп периодической системы Менделеева) не представляется возможным из-за их высокой химической активности и практически полного окисления в процессе ЭЭЛ.

Для отработки технологии нанесения покрытий использовались образцы размером 15x15x8 мм з конструкционной стали 45,

нержавеющей стали 07X16H6 и быстрорежущей стали P6M5 и никелевого сплава ХН58МБЮД.

ЭЭЛ осуществлялось на установке «УИЛВ - 8». Легкоплавкие металлы наносились на «мягких» режимах ($W_p=0,02$ Дж), а износостойкие тугоплавкие металлы - на средних режимах, когда $W_p=0,42$ Дж.

Шероховатость получаемых покрытий измеряли на приборе профилографе-профилометре мод. 201.

Результаты исследований

При ЭЭ стали 45 тугоплавкими износостойкими металлами Ti, V, W и их карбидами, а также легкоплавкими металлами Cd, In, Sn, Pb установлено:

– исходя шероховатость образцов $Ra=0,23$ мкм после нанесения покрытия Ti, V, W увеличивается соответственно до 2,82, 3,22 и 3,2 мкм;

– при последующей обработке электродом одного из легкоплавких металлов шероховатость поверхности меняется незначительно;

– при нанесении первоначально в качестве технологического покрытия одного из легкоплавких металлов (Cd, In, Sn, Pb) с последующим нанесением основного покрытия из износостойкого тугоплавкого металла наблюдается резкое снижение шероховатости поверхности до $Ra=0,54...0,91$ мкм. Аналогичные результаты по снижению шероховатости обеспечиваются и тогда, когда в качестве технологического покрытия используется мягкий антифрикционный металл медь.

Данный порядок формирования слоев при нанесении второго слоя способствует расправлению первоначально нанесенного технологического покрытия из более легкоплавкого металла, заполнению им шероховатостей и пор основного покрытия.

Кристаллизация второго слоя происходит медленнее за счет аккумуляции тепла расплавом легкоплавкого металла. В результате этого образуется структура покрытия типа механической смеси.

При использовании в качестве технологического покрытия сурьмы выделяются высокотоксичные газы, поэтому такая технология не может быть рекомендована к применению.

На основании вышеизложенного, к практическому применению можно рекомендовать способ формирования КЭП, когда первоначально на упрочняемую поверхность, при энергии разряда, $W_p=0,02$ Дж, наносят технологическое покрытие металлом, выбранным из группы (In, Cd, Sn, Pb, Cu). Затем, при $W_p=0,42$ Дж наносят основное покрытие, выбранное из группы износостойких тугоплавких металлов (Ti, V, W) и их карбидов.

В результате металлографических исследований образцов из стали P6M5, 07X16H6

и стали 45 с КЭП выяснилось, что использование в качестве технологического покрытия легкоплавких металлов, выбираемых из группы In, Cd, Sn, Pb при последующем их ЭЭЛ износостойкими тугоплавкими материалами, приводит к снижению не только шероховатости

поверхностного слоя, но и микротвердости. Например, на рис. 1 изображены структуры поверхностного слоя быстрорежущей стали Р6М5 с различными КЭП: In+ВК8 (а), In+Т15К6 (б) и In+ Cr (в).

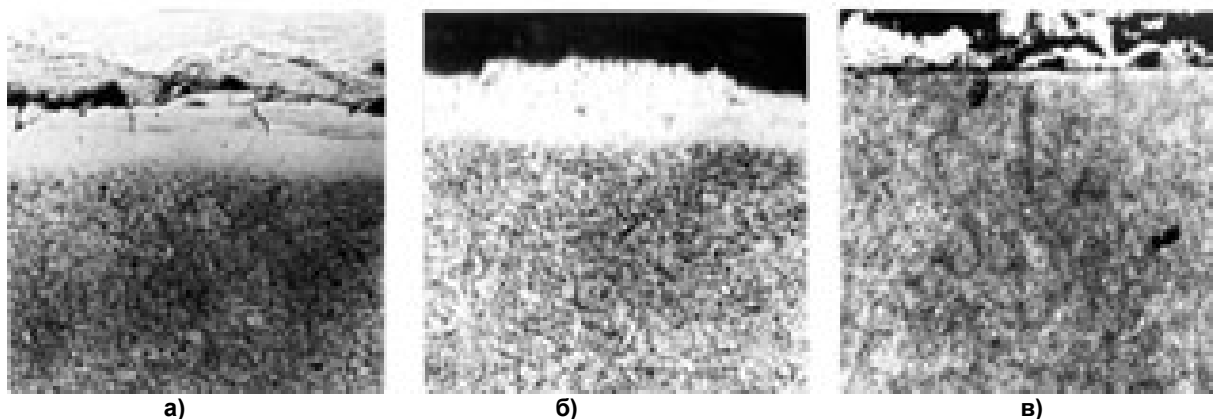


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя стали Р6М5 с КЭП: а - In+ВК8, б - In+Т15К6, в - In+ Cr, $\times 400$.

ЭЭЛ образцов производилось на установке «УИЛВ - 8», при этом In наносился на 1-м режиме ($W_p=0,02$ Дж), а твердый сплав ВК8, Т15К6 и хром - на 5-м режиме ($W_p=0,42$ Дж).

Измерение микротвердости по плоскости покрытия In+ВК8 показывает, что области со структурой типа дисперсной эвтектики имеют микротвердость $H_{\mu}=7850$ МПа, светлые, не травящиеся участки - 6700 МПа. На их фоне

имеются светлые включения с $H_{\mu}=9700$ МПа. При последовательности In+Т15К6 светлые, не травящиеся поля имеют микротвердость $H_{\mu}=6700 - 7800$ МПа, серые поля - 6700 МПа, светлые включения - $H_{\mu}=13000 - 16600$ МПа.

Результаты измерения микротвердости по мере углубления с поверхности КЭП занесены в табл. 1.

Таблица 1- Результаты металлографических исследований КЭП на стали Р6М5

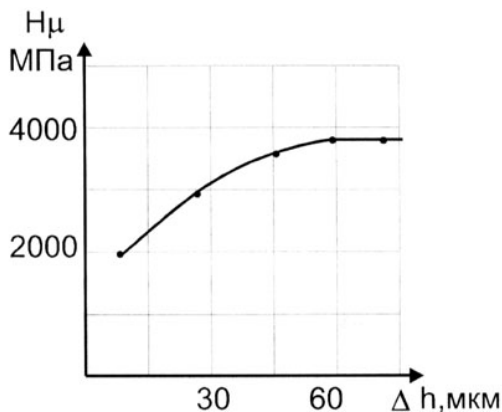
Материал покрытия	Толщина, мкм		Микротвердость, H_{μ} , МПа		
	слоя	переходной зоны	слоя	переходной зоны	основы
In+ВК8	20	40	6400, 6400	7040, 8900, 8300	9850
In+Т15К6	30	40	7800, 8300	8300, 8300, 8300	То же
In+ Cr	20	30	5700, 7450	7850, 8000	То же

Аналогичная ситуация складывается при нанесении КЭП на нержавеющую сталь 07Х16Н6. На рис. 2 изображена структура поверхностного

слоя стали 07Х16Н6 (а) и распределение микротвердости по глубине слоя (б) при формировании КЭП (ЭЭЛ In+ЭЭЛ W).



а)



б)

Рис. 2. Микроструктура (а) и распределение микротвердости по глубине слоя (б) КЭП In+W на нержавеющей стали 07Х16Н6, $\times 400$.

Легированный слой почти не просматривается. В данном случае происходит

закалка с аустенитообразованием непосредственно наружного слоя подложки, что

приводит к существенному снижению микротвердости. Затем твердость повышается и уже на глубине 50...80 мкм соответствует твердости основного металла.

При ЭЭЛ стали 45 карбидом вольфрама микротвердость, по мере углубления с поверхности образца, при «шаге» измерения 10 мкм, располагается в ряд: 12500, 11000, 4700, 3300, 2800 МПа, а при первоначальном ЭЭЛ индием, затем карбидом вольфрама - 2000, 2500, 3800, 2800 МПа.

Опыт показывает, что микротвердость КЭП, сформированных с использованием в качестве технологического покрытия не только In, а и таких легкоплавких металлов, как Cd, Sn и Pb остается низкой.

Известно, что при ЭЭЛ легкоплавких металлов и их сплавов привес катода (детали) весь период обработки остается отрицательным. В нашем случае, в результате ЭЭЛ стальной подложки легкоплавким материалом, на катоде происходит взаимодействие жидких фаз материала электродов, способствующее установлению между ними химической связи и развитию объемных процессов само- и гетеродиффузии, образованию интерметаллидов, сплавов, псевдосплавов, механических смесей и т.п. Как правило, на поверхности вновь образованный слой состоит из материала анода с постепенным снижением

концентрации по мере углубления. Поэтому, последующее легирование вновь образованного слоя из легкоплавкого материала износостойким более тугоплавким материалом затруднено самой физикой процесса ЭЭЛ.

Так как процесс ЭЭЛ осуществляется через жидкую ванну, то для осуществления стабильного массопереноса износостойкого тугоплавкого материала необходимо, чтобы он протекал при режимах легирования, достаточных для расплавления ранее нанесенного слоя из легкоплавкого материала.

Отсюда следует, что микротвердость КЭП в значительной мере зависит от количества мягкого, более легкоплавкого материала в технологическом подслое.

Учитывая то, что наиболее стабильные результаты по массопереносу обеспечиваются при ЭЭЛ металлических поверхностей медью, металлографические исследования по определению влияния количества мягкой составляющей в КЭП на микротвердость поверхностного слоя проводились с использованием в качестве технологического подслоя из меди.

На рис. 2 изображена микроструктура поверхностного слоя стали 45 с различным количеством меди в покрытии.

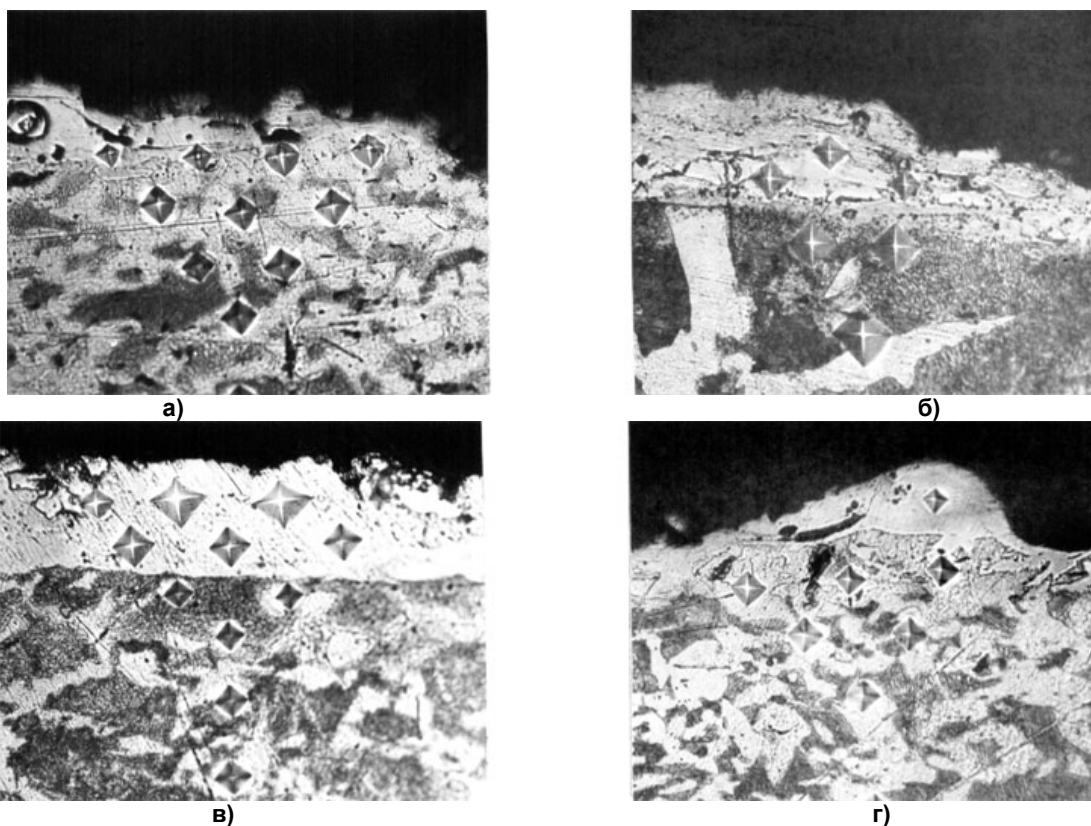


Рис. 2 Микроструктура поверхностного слоя стали 45 с различным содержанием меди в покрытии: а - 28,46; б - 51,26; в - 115,3; г - $156,3 \text{ г} \cdot 10^4 / \text{см}^2$, $\times 400$.

Таблица 2 - Результаты металлографических исследований КЭП на стали 45 с различным содержанием меди в покрытии

Привес образца $\Delta P_{\text{к}}$, г. $10^4/\text{см}^2$	Толщина, мкм		Микротвердость, $H_{\text{и}}$, МПа		Шероховатость R_a , мкм
	слоя	переходной зоны	слоя, до	переходной зоны	
28,46	10...20	20	4480	2200...2600	1,8
51,26	10...15	25	10490	2300...3570	0,5
115,3	5...10	10	6420	2000...3700	0,6
156,3	10...20	20	4790	1920...2300	0,8
23,17*	15...30	5...10	2500,12300	3300...4300	2,4

*Покрытие из меди наносилось вторым слоем после твердого сплава ВК8.

Как видно из табл. 2 лучшими показателями по шероховатости и микротвердости поверхностного слоя обладают КЭП с подслоем из меди, нанесенном на 3-м режиме ($W_p=0,02$ Дж) и основного покрытия из твердого сплава ВК8, нанесенного на 5-м режиме ($W_p=0,42$ Дж).

Для сравнения на один из образцов (рис.3) стали 45 наносили КЭП в последовательности: твердый сплав ВК8+Cu, причем твердый сплав наносился на 5- м режиме ($W_p=0,42$ Дж), а медь - на 3-м режиме (0,02 Дж).

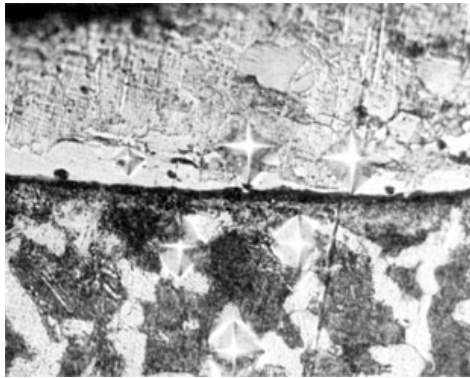


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя стали 45 с КЭП ВК8+Cu.

При нанесении первоначально тугоплавкого покрытия, затем меди микротвердость поверхностного слоя составляет $H_{\text{и}}=2300... 2500$ МПа. Глубина распространения слоя с такой микротвердостью - до 30 мкм. Затем, по мере углубления, находится слой толщиной 5 - 10 мкм с более высокой микротвердостью ($H_{\text{и}}=8000...12300$ МПа) и далее - переходная зона с микротвердостью $H_{\text{и}}=3300...4300$ МПа. Изредка на поверхности покрытия встречаются участки с высокой микротвердостью до $H_{\text{и}}=11500$ МПа. Шероховатость КЭП, сформированных по схеме ВК8+Cu, достигает 2,4 мкм.

Таким образом, с целью повышения микротвердости и снижения шероховатости в поверхностном слое упрочняемых деталей предлагается первоначально наносить слой «технологического» покрытия мягким, антифрикционным металлом медью, а затем - слой из твердого износостойкого металла или его карбида, выбираемого из группы Ti, V, W. Причем, медь наносится на 3-м режиме ($W_p=0,02$ Дж), а износостойкий высокотвердый металл - на 5-м режиме ($W_p=0,42$ Дж).

Металлографические исследования КЭП по предлагаемому способу сведены в табл. 3.

Таблица 3 - Результаты металлографических исследований КЭП

Материал покрытия	Микротвердость, МПа		Шероховатость поверхности R_a , мкм
	слоя	переходной зоны	
Без покрытия	2800	2800	0,23
Ti	10800, 9600	3700, 3100	2,81
Ti+Cu	2500, 2500, 9500	3600, 3120	2,80
Cu+Ti	10500, 10500	4800, 3700	0,90
V	8500, 7300	3800, 3300	3,19
V+Cu	2300, 2300, 8200	3800, 3300	2,80
Cu +V	8400, 7800	3900, 3300	0,80
W	9500, 8200	3800, 3400	3,26
W+Cu	2500, 2500, 8100	4300, 3600	3,14
Cu +W	9500, 9100	3700, 3200	0,65
TiC	12000, 11500	3900, 3300	3,07
TiC+Cu	2500, 2500, 9500	3600, 3400	2,91
Cu +TiC	12000, 11500	3900, 3300	0,82
VC	10000, 9000	4200,3200	3,16
VC+Cu	2400, 2400, 9000	4200, 3400	2,80
Cu +VC	10500, 9600	3900, 3200	0,62
WC	12500, 11000	4700, 3300	2,96
WC+Cu (a)	2350, 2350, 12300	4190, 3300	2,81

WC+Cu (б)	11500, 10490	4760, 2860	2,81
Cu+WC	12300, 10490	3570, 3300	0,48
In+WC	1970, 2500	3860, 3570	0,52
Pb+WC	2600, 3969	3700, 3300	0,56
Cd +WC	2300, 3800	3600, 3300	0,77
Sn+WC	2000, 3500	4200, 3100	0,59

Металлографические исследования КЭП по предлагаемому способу показывают, что их микротвердость находится на сравнительно высоком уровне (8400...12300 МПа). Следует отметить, что сверху покрытия находится пленка меди толщиной 1...2 мкм. Все покрытия, сформированные предлагаемым способом, имеют характерный желтый цвет. Наличие меди, как на поверхности, так и по глубине покрытия подтверждается рентгеноструктурным анализом.

Медь имеет более низкую температуру плавления ($T_{пл.}=1083$ °С), чем металлы основного покрытия ($T_{пл.}=1672...3410$ °С). В процессе кристаллизации образуется структура типа механической смеси с частичным образованием твердого раствора.

Данный порядок нанесения слоев покрытия способствует расплавлению первоначально нанесенного покрытия из более легкоплавкого металла меди при нанесении второго слоя,

заполнению им микронеровностей и пор основного покрытия. Кристаллизация второго слоя происходит медленнее за счет аккумуляции тепла расплавом меди, при этом шероховатость поверхности снижается до $Ra=0,5...0,9$ мкм.

С целью расширения области применения, а также улучшения качественных характеристик поверхностных слоев исследовались квазимногослойные КЭП, сформированные по схеме ВК8+Cu+ВК8, при этом первый слой из твердого сплава ВК8 наносился для всех случаев на 5-м режиме ($W_p=0,42$ Дж), а второй (медь) и третий (твердый сплав ВК8) - на различных режимах.

Микроструктура поверхностных слоев стали 45 с квазимногослойными КЭП изображена на рис. 4, а результаты металлографических исследований, представлены в табл. 4.

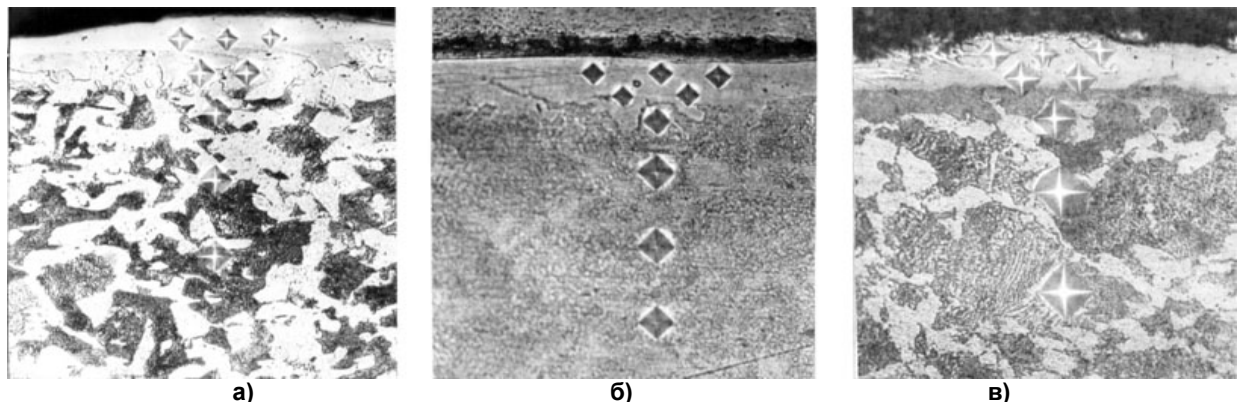


Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя стали 45, сформированного в последовательности ВК8+Cu+ВК8, $\times 400$.

Первый слой наносился для всех трех случаев на 5-м режиме при $W_p=0,42$ Дж. Второй и третий, соответственно: **а** – при $W_p=0,02$ Дж и

$W_p=0,03$ Дж; **б** - при $W_p=0,02$ Дж и $W_p=0,42$ Дж; **в** - при $W_p=0,28$ Дж и $W_p=0,42$ Дж.

Таблица 4 - Результаты металлографических исследований квазимногослойных КЭП на стали 45

Материал электрода	Режим	Толщина, мкм		Микротвердость, МПа		Шероховатость Ra, мкм
		слоя	переходной зоны	слоя	переходной зоны	
ВК8	5 / 300					
Cu	3 / 20 *					
ВК8	5 / 20 **	10...12	10...15	6420...7570	3500...4480	0,5
ВК8	5 / 300					
Cu	3 / 20					
ВК8	5 / 300	до 15	до 10	5520...6970	4480	0,5
ВК8	5 / 300					
Cu	3 / 300***					
ВК8	5 / 300****	12...20	15...20	6330...8740	6030...6600	0,5

* $W_p=0,02$ Дж.

** $W_p=0,03$ Дж.

*** $W_p=0,28$ Дж.

**** $W_p=0,42$ Дж.

Во всех трех случаях качество сформированных покрытий высокое. Микротвердость поверхностного слоя находится на уровне ($H_{\mu}=6420...8740$ МПа), шероховатость $Ra=0,5$ мкм, резкие перепады микротвердости в переходной зоне отсутствуют. Микротвердость, высокая на поверхности, по мере углубления плавно снижается до микротвердости основного металла. Наиболее предпочтительным является

КЭП, когда первый и последний слой из твердого сплава ВК8 наносились на 5-м режиме ($W_p=0,42$ Дж), а промежуточный (медь) - на 3-м режиме ($W_p=0,28$ Дж).

КЭП на образцах из никелевого сплава ХН58МБЮД, сформированные в последовательности $Cu+VK8$ и $VK8+C_u+VK8$, не обеспечивают желаемой микротвердости в поверхностном слое (рис. 5).

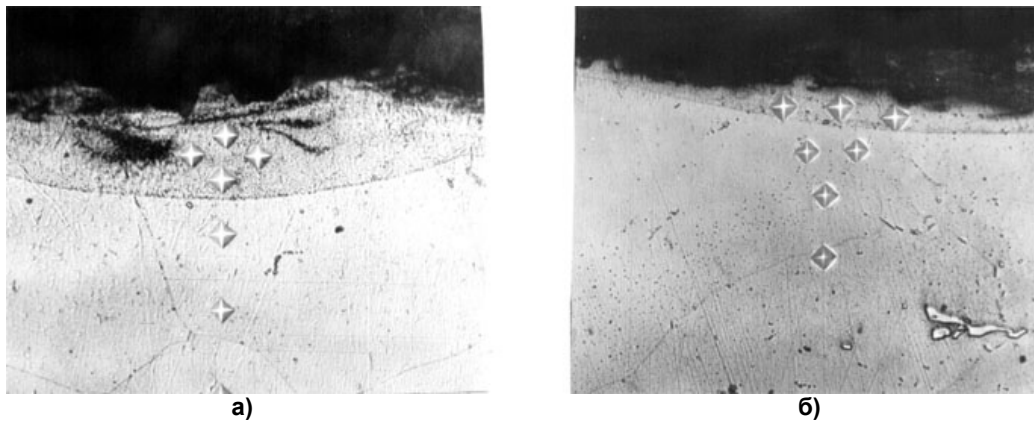


Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя никелевого сплава ХН58МБЮД с КЭП: а - C_u+VK8 , б - $VK8+C_u+VK8$, $\times 400$.

В данном случае медь наносилась на 3-м режиме ($W_p=0,02$ Дж), а твердый сплав ВК8 - на 5-м режиме ($W_p=0,42$ Дж).

упрочнении никелевого сплава ХН58МБЮД обеспечивают КЭП, созданные по схеме $VK8+VK8+C_u$ и $VK8+VK8+Ni$ (рис. 6, табл. 5).

Положительные результаты при

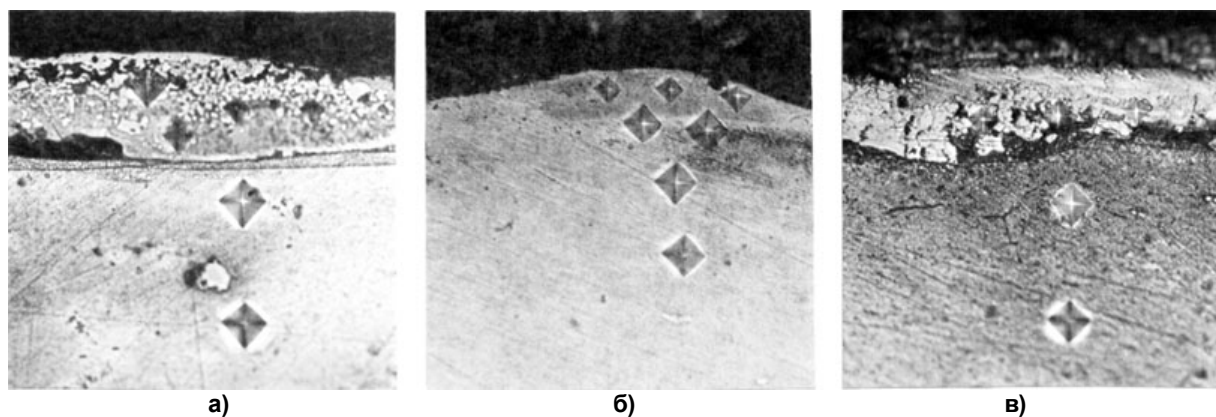


Рис. 6. Микроструктура поверхностного слоя никелевого сплава ХН58МБЮД с КЭП: а - $VK8+VK8$, б - $VK8+VK8+C_u$, в - $VK8+VK8+Ni$, $\times 400$.

С целью получения более плотных и менее шероховатых покрытий процесс поверхностного легирования твердым сплавом ВК8 проводили в два этапа. Сначала осуществляли более жесткий режим ($W_p=0,42$ Дж), что позволило внедрить в обрабатываемую поверхность большое количество упрочняющего материала. Однако шероховатость упрочняемой поверхности в этом случае была неприемлемо высокой: $Ra=4,8$ мкм. На втором этапе применяли мягкий режим ($W_p=0,02$ Дж), при котором снижалась

шероховатость поверхности и увеличивалась его сплошность. Шероховатость «выглаженной» поверхности $Ra=1,6$ мкм. Третий слой - из меди или никеля - наносился на том же режиме, что и предыдущий ($W_p=0,02$ Дж). Шероховатость в этом случае ещё более снизилась ($Ra=0,8...1,0$ мкм), а микротвердость находилась на достаточно высоком уровне ($H_{\mu}=9270$ и 9850 МПа) соответственно.

Таблица 5 - Результаты металлографических исследований квазимногослойных КЭП на никелевом сплаве ХН58МБЮД

Последовательность нанесения	Толщина слоя, мкм	Микротвердость H_{μ} , МПа	Сплошность, %	Шероховатость, Ra , мкм
------------------------------	-------------------	--------------------------------	---------------	---------------------------

покрытия				
C _u +BK8	10...12	3300...3700	90	0,6
BK8+C _u +BK8	10...15	3300...3700	100	0,6
BK8+ BK8	10...20	9270...9850	100	1,6
BK8+ BK8+ C _u	15...20	8740...9270	100	0,8
BK8+ BK8+Ni	15...25	до 9850	100	1,0

Выводы:

Таким образом, из проведенных исследований следует:

1. При упрочнении стали 45 наиболее предпочтительными являются КЭП, сформированные по схеме BK8+C_u+BK8, когда первый и последний слои из твердого сплава BK8 наносятся при $W_p=0,42$ Дж, а промежуточный (медь) при $W_p=0,28$ Дж.

2. Положительные результаты при упрочнении никелевого сплава ХН58МБЮД обеспечивают КЭП, созданные по схеме BK8+BK8+C_u и BK8+BK8+Ni, когда первый слой из твердого сплава BK8 наносится при $W_p=0,42$ Дж, а промежуточный из того же материала и третий из меди или никеля при $W_p=0,02$ Дж..

Список використаної літератури:

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Гаркунов Д.Н. - М.: Машиностроение, 1989.- 327 с.
2. Мосталыгин Г.П. Технология машиностроения / Г.П.Мосталыгин, Н.Н.Толмачевский - М.: Машиностроение, 1990.- 288 с.
3. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А.Хворостухин, С.В.Шишкин, А.П.Ковалев, Р.А.Ишмаков – М.: Машиностроение, 1988.- 144 с.
4. Верхотуров А.Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А.Д.Верхотуров, И.М.Муха - К.: Техника, 1982.- 181 с.
5. Коробейник В.Ф. Особенности формирования микротопографии, структуры и субструктуры поверхностного слоя при электроискровом легировании / В.Ф.Коробейник, С.И.Рудюк, С.В.Коробейник // Электронная обработка материалов.- 1989.- № 1.- С. 15-17.
6. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е.Гитлевич, В.В.Михайлов, Н.Я.Парканский, В.М.Ревутский – Кишинев: Штинца, 1985.- 196 с.
7. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г.В.Самсонов, А.Д.Верхотуров, Г.А.Бовкун, Сычев В.С. – К.: Наукова Думка, 1976.- 220 с.
8. Гитлевич А.Е. Об ограничении толщины слоев, формируемых в процессе электроискрового легирования / А.Е.Гитлевич, Н.Я.Парканский, Д.А.Игнатков // Электронная обработка материалов. - 1981.- №3.- С. 25-29.
9. Чаругин Н. В. Влияние физико-химических явлений на технологические показатели процесса электроискрового легирования: / Н.В.Чаругин Автореф. дис. к. т. н.- Тула, 1984.- 16с.
10. Чаругин Н.В. Физико-химические явления при электроискровом легировании металлов / Н.В.Чаругин, Н.Г.Мещеряков // Физико-химическая механика материалов.- 1989.- №4.- С. 43-48.
- 11.Верхотуров А.Д. Хрупкое разрушение поверхностного слоя, формируемого в процессе электроискрового легирования / А.Д.Верхотуров, И.А.Подчерняева, С.В.Кириленко // Электронная обработка материалов.- 1986.- №1.- С. 28-31.
- 12.А. с. 1313610 СССР, МКИ В 23 Н 9/00. Способ формирования покрытий/ Н.В. Чаругин, Г.Н.Мещеряков (СССР).- № 3960841/31-08; Заявлено 19.08.85 ; Оpubл. 30.05.87, Бюл. №20.- 3 с.
- 13.А. с. 1212722 СССР, МКИ В 23 Н 9/00. Способ электроэрозионного легирования / В.А.Аникаев,А.И.Уршанский, В.К.Рыбаков, В.П.Ашихмин, Б.П.Кузнецов, Н.К.Махнев, А.В.Бородин (СССР).- № 3728222/25-08; Заявлено 16.04.84 ; Оpubл. 23. 02. 86, Бюл. №7.- 3 с.

Тарельник В.Б., Думанчук М.Ю. Підвищення якості відповідальних деталей машин технологіями на базі електроерозійного легування

Представлено результати досліджень комбінованих електроерозійних покриттів (КЕП) поверхневих шарів сталевих і нікелевих зразків. КЕП, сформовані із твердих зносостійких і м'яких антифрикційних металів, дозволять значною мірою підвищити надійність і довговічність відповідальних деталей при виготовленні й ремонті машин.

Ключові слова: *якість поверхні, мікротвердість, шорсткість, товщина шару, електроерозійне легування, комбіновані електроерозійні покриття*

Tarelnyk V., Dumanchuk M. Upgrading of responsible details of machines by technologies on the base of the electro-erosive alloying

The results of researches of the combined electro-erosive coverages of superficial layers of steel and nickeliferous standards are presented. Combined electro-erosive coverages formed from hard wearproof and soft anti-friction metals will allow to a great extent to promote reliability and longevity of responsible details at making and repair of machines.

Keywords: *quality of surface, microhardness, roughness, thickness of layer, electro-erosive alloying, combined electro-erosive coverages*

Стаття надійшла в редакцію: 03.04.2015р.

Рецензент: д.т.н., проф. Кочмола М.М.

УДК 621.65.