

В.Ф. Гологан, Ж.И. Бобанова, С.Х. Ивашку

## ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОГО УСТРОЙСТВА НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ХРОМА

*Институт прикладной физики Академии наук Республики Молдова,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, [bobanova@phys.asm.md](mailto:bobanova@phys.asm.md)*

Во многих работах показано, что условия электролиза в основном определяют кинетические особенности электрокристаллизации, а следовательно, и свойства гальванических покрытий [1, 2].

Ранее установлено, что изменение параметров индуктивно-емкостного устройства (индуктивность и емкость), подключенного последовательно к источнику питания, приводит к изменению в широких пределах (200 мВ) потенциала катода в процессе осаждения хрома. При наибольшем сдвиге потенциала катода в положительную область увеличивался выход по току, уменьшались шероховатость и неравномерность толщины покрытия [3].

Цель настоящей работы – исследование влияния параметров индуктивно-емкостного устройства (ИЕУ) на структуру и износостойкость хромовых покрытий и определение оптимальных условий электролиза.

### **Методика проведения исследований**

Условия осаждения покрытий были выбраны с учетом результатов, полученных в [3]. Покрытия наносили на образцы в универсальном электролите хромирования следующего состава, г/л: хромовой ангидрид – 250; серная кислота – 2,5, при температуре раствора  $t_{эл} = 55^\circ\text{C}$  и катодной плотности тока 5,5–12,0 кА/м<sup>2</sup>.

Источником питания служил 3-фазный выпрямитель модели ВСЖ-303.

К источнику питания подключалось индуктивно-емкостное устройство, в котором индуктивность ( $L$ ) изменялась в пределах 0,027–0,456 мГн, а емкость  $C$  составляла 0,024 Ф. Регулирование тока в цепи осуществлялось резистор-балластом модели РБ-302У2.

Для изучения морфологии, структуры и поверхности трения покрытий использовали оптические (НЕОРНОТ-2, ММ-6) и электронно-сканирующие (Stereoscan-150, Tesla BS-340) микроскопы. Микротвердость осадков определяли микротвердомером модели ПМТ-3 согласно ГОСТу 9450-76 при нагрузке на индентор 100 гс.

Шероховатость поверхности определялась профилометром-профилографом Form Talysurf Intra Series 50 фирмы Taylor Hobson.

Методика испытания на трение и износ была выбрана с учетом результатов ранее выполненных исследований [4]. опыты проводились на машине трения СМЦ-2 при скорости скольжения  $v = 0,785$  м/с и давлении  $P = 0,198$  ГПа в условиях сухого трения. Испытаниям подвергались покрытия на круглых образцах (диаметр ролика 50 мм), которые после шлифования обладали толщиной 0,32–0,35 мм и шероховатостью  $R_a = 0,32$ –0,16 мкм. В качестве контртела применялся чугун СЧ 24-44 с площадью контакта 1 см<sup>2</sup>. Температуру вблизи зоны трения измеряли при помощи термопары и самопишущего милливольтметра модели КСП-4, а величину момента трения регистрировали компенсационным самописцем модели ЛКС-4-003.

### **Результаты и их обсуждение**

Исследования показали, что параметры ИЕУ оказывают существенное влияние на морфологию электролитических покрытий хрома.

У покрытий, полученных при стандартных условиях электролиза без подключения устройства при оптимальном режиме ( $i_k = 5,5$  кА/м<sup>2</sup>), на поверхности образовывались кристаллические агрегаты

различной конфигурации и размеров, имевшие беспорядочное расположение и четко выраженные границы. Эти агрегаты состоят из более мелких элементов, которые также отличаются по своим размерам и конфигурации. В отдельных случаях наблюдаются агрегаты сфероидального вида (рис. 1,а).

Подключение ИЕУ с параметрами, сдвигающими потенциал катода в более отрицательную область по сравнению с его значением при осаждении без ИЕУ, приводит к появлению отдельных кристаллических образований более крупных размеров при одновременном измельчении остальных агрегатов (рис. 1,б,в).

В случае осаждения при оптимальных значениях индуктивности и емкости ИЕУ ( $L_{\text{оп}} = 0,119$  мГн,  $C_{\text{оп}} = 0,024$  Ф) [3] происходит формирование более однородной и гладкой поверхности из-за отсутствия крупных кристаллических агрегатов. Кроме того, увеличивается количество более мелких составляющих, обеспечивающих срастание границ более крупных кристаллов (рис. 1,г).

При осаждении хрома в обычном режиме при плотности тока  $8,5$  кА/м<sup>2</sup> на поверхности покрытия наблюдаются агрегаты различных размеров, многие из которых сфероидального типа (рис. 1,д). По сравнению с покрытиями, полученными при  $5,5$  кА/м<sup>2</sup> без подключения контура, рассматриваемая поверхность менее однородна, пространство между более крупными образованиями заполняется мелкими агрегатами, что приводит к увеличению количества макродефектов.

Подключение ИЕУ с оптимальными параметрами ( $L_{\text{оп}} = 0,119$  мГн,  $C_{\text{оп}} = 0,024$  Ф) обеспечивает получение гладкой и однородной поверхности покрытия при той же плотности тока (рис. 1,е). При тщательном рассмотрении видно, что на поверхности образуются активные центры, вокруг которых происходит разрастание покрытия, однако эти центры возвышаются незначительно и не приводят к образованию границ при их сопряжении.

Увеличение плотности тока ( $i_k = 10,0$ – $12,0$  кА/м<sup>2</sup>) при тех же параметрах ИЕУ приводит к формированию более грубой поверхности по сравнению с предыдущей (рис. 1,ж, з). На поверхности образуются активные центры, которые в отличие от предыдущего случая (рис. 1,е) разрастаются до больших размеров, и их сопряжение обеспечивается образованием более мелких агрегатов различной ориентации (рис. 1,з), или же в местах сопряжения образуются четкие границы (рис. 1,ж).

Измерения шероховатости поверхности покрытий показали, что осадки, полученные с подключенным ИЕУ, более гладкие и сохраняли блеск до плотности тока  $12,0$  кА/м<sup>2</sup> (табл. 1). Шероховатость поверхности покрытий, полученных в обычных условиях при плотности тока  $5,5$  кА/м<sup>2</sup>, была более высокой, чем у покрытий, осажденных с ИЕУ при оптимальных параметрах, то есть при плотностях тока  $5,5$ – $12,0$  кА/м<sup>2</sup>.

Более шероховатыми оказались покрытия, полученные при  $i_k = 5,5$  кА/м<sup>2</sup>, с параметрами контура  $L_{\text{оп}} = 0,456$  мГн,  $C_{\text{оп}} = 0,024$  Ф ( $R_a = 0,86$  мкм,  $R_z = 3,94$  мкм). Однако наибольшая шероховатость обнаружена у покрытий, осажденных при  $i_k = 8,5$  кА/м<sup>2</sup> без подключения устройства ( $R_a = 2,6$  мкм,  $R_z = 8,68$  мкм).

Наименьшей шероховатостью обладала поверхность покрытия, полученного при  $i_k = 8,5$  кА/м<sup>2</sup>, с подключением ИЕУ и оптимальными параметрами ( $R_a = 0,12$  мкм,  $R_z = 0,8$  мкм).

Вышеописанные результаты оценки шероховатости поверхности хромовых покрытий хорошо согласуются с их морфологией (рис. 1,г).

Результаты исследования структуры покрытий на торцевом сечении также свидетельствуют о существенном влиянии параметров ИЕУ на процесс осаждения электролитического хрома (рис. 2).

Покрытия, осажденные без устройства при  $5,5$  и  $8,5$  кА/м<sup>2</sup>, состояли из агрегатов различных размеров (рис. 2,а,б). При сопряжении крупных блоков (~  $5$ – $10$  мкм) во многих случаях образуются микродефекты в виде микротрещин и пор. Их количество уменьшалось при образовании на границах более мелких агрегатов, которые обеспечивают сплошность покрытия. Поэтому шероховатость поверхности шлифов, видимо, обусловлена тем, что при полировании образцов сами агрегаты не разрушались, а разделялись по своим границам. Как видно на представленных снимках, увеличение плотности тока ( $i_k = 8,5$  кА/м<sup>2</sup>) не привело к значительным изменениям в структуре осадка хрома.

Покрытия, полученные с применением ИЕУ при оптимальных значениях ( $L_{\text{оп}}$ ,  $C_{\text{оп}}$ ), также существенно отличались по своей структуре от вышеуказанных. Кристаллические агрегаты имеют вытянутую форму (рис. 2,б,г), расположены перпендикулярно к подложке, незначительно отличаясь по своим размерам ( $2$ – $5$  мкм в поперечном сечении). Благодаря уменьшению размеров кристаллических образований и их форме облегчается сопряжение агрегатов друг с другом. Как и в предыдущем случае, прочность самих элементов структуры более высокая, чем силы связи по их границам.

Покрyтия, осажженные при  $i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$  (рис. 2,з), по сравнению с осадками, полученными при  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$  (рис. 2,б), являются более мелкодисперсными с идентичными размерами агрегатов, что и отразилось на формировании их морфологии и шероховатости поверхности (рис. 1,е, табл. 1), и, видимо, это стало возможным благодаря более равномерному распределению тока по покрываемой поверхности.

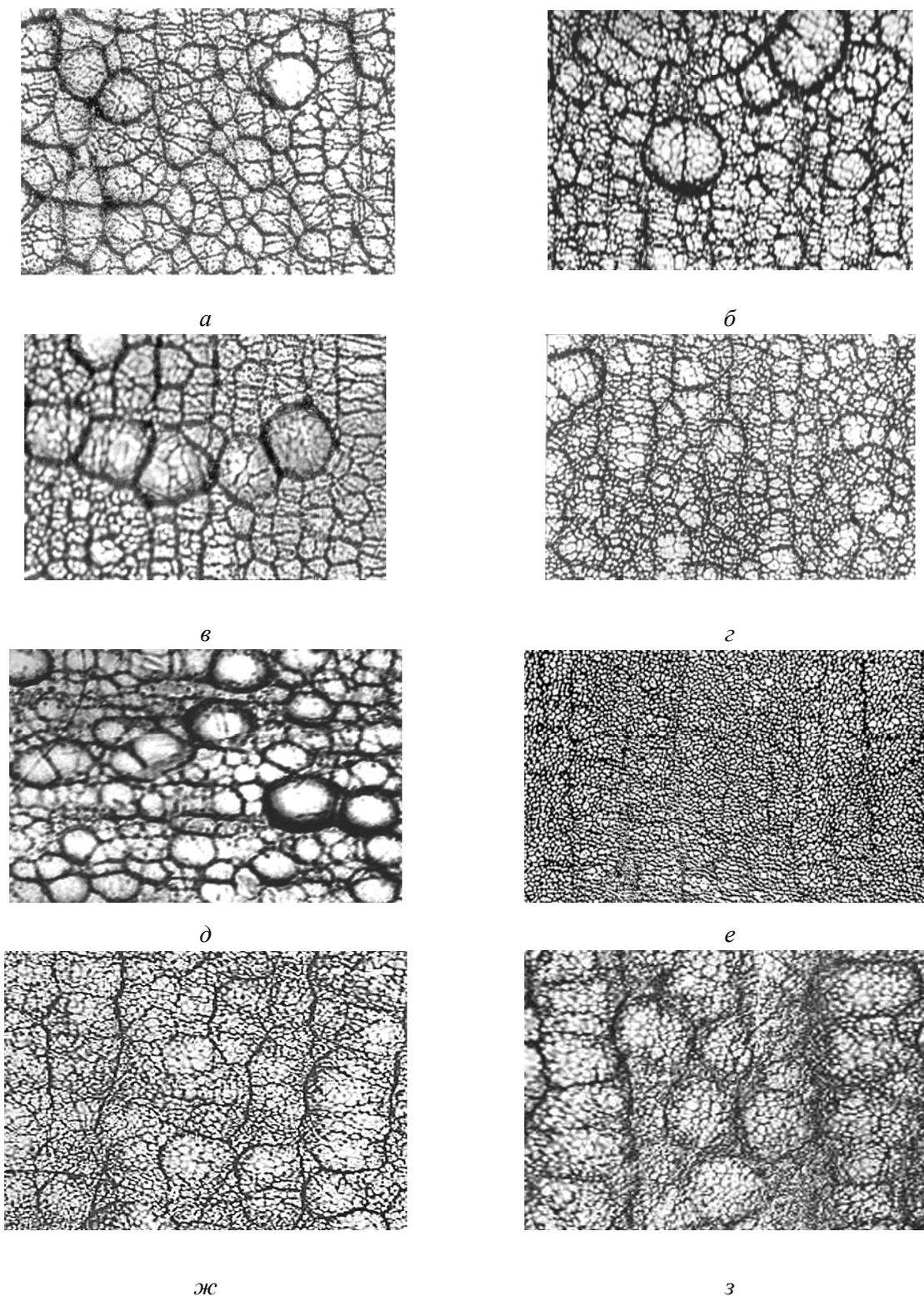
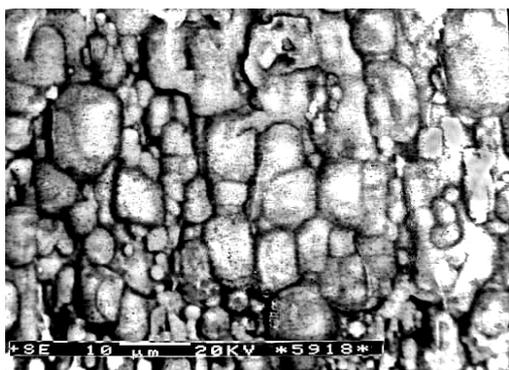
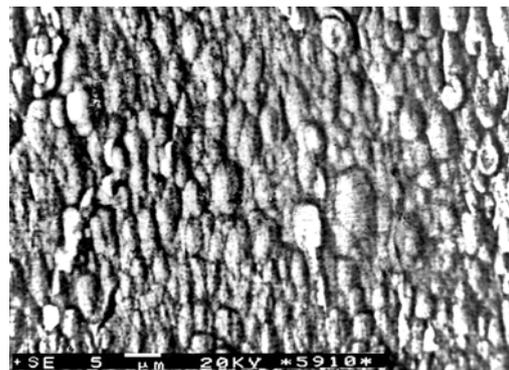


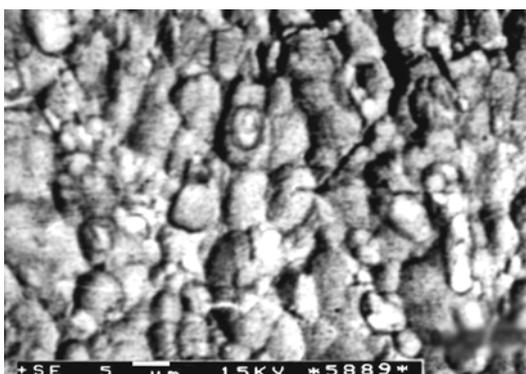
Рис. 1. Влияние условий осаждения покрытий на их морфологию ( $\times 500$ ),  $C = 0,024 \text{ Ф}$ : а –  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ , без устройства; б –  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ , с устройством ( $L=0,456 \text{ мГн}$ ); в – то же ( $L = 0,027 \text{ мГн}$ ); г – то же ( $L = 0,199 \text{ мГн}$ ); д –  $i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$ , без устройства; е –  $i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$ , с устройством ( $L = 0,199 \text{ мГн}$ ); ж – то же,  $i_k = 10,0 \text{ кА/м}^2$ ; з – то же,  $i_k = 12,0 \text{ кА/м}^2$



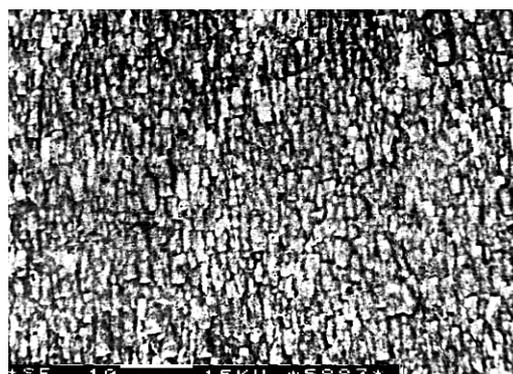
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 2. Влияние условий осаждения на структуру покрытий,  $C = 0,024 \Phi$ : *a* –  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ , без устройства; *б* –  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ , с устройством ( $L = 0,199 \text{ мГн}$ ); *в* –  $i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$ , без устройства; *г* –  $i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$ , с устройством ( $L = 0,199 \text{ мГн}$ )

Таблица 1. Влияние параметров индуктивно-емкостного устройства на шероховатость покрытий

Условия осаждения	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм
$i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$	0,76	3,8
$i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$	2,6	8,68
С подключением ИЕУ ( $L = 0,456 \text{ мГн}$ , $C = 0,024 \Phi$ ): $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$	0,86	3,94
С подключением ИЕУ ( $L = 0,119 \text{ мГн}$ , $C = 0,024 \Phi$ ): $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$	0,51	2,5
$i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$	0,12	1,1
$i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$	0,628	3,16
$i_k = 10,0 \text{ кА/м}^2$	0,66	3,8
$i_k = 12,0 \text{ кА/м}^2$		

Изменение структуры хромовых покрытий при использовании ИЕУ оказало влияние и на их микротвердость (табл. 2).

У покрытий, осажденных при  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ , микротвердость возрастала с 9,3 до 10,5 ГПа при использовании контура. Наибольшей твердостью обладали покрытия, полученные при  $i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$  с ИЕУ ( $H_\mu = 11,3 \text{ ГПа}$ ), и при дальнейшем повышении плотности тока  $H_\mu$  уменьшалась и при  $i_k = 12,0 \text{ кА/м}^2$  составила 9,6 ГПа.

Таблица 2. Влияние параметров индуктивно-емкостного устройства на микротвердость покрытий

Условия осаждения	$H_{\mu}^{100}$ , ГПа
$i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$	9,3
С подключением ИЕУ ( $L = 0,119 \text{ мГн}$ , $C = 0,024 \text{ Ф}$ ):	
$i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$	10,5
$i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$	11,3
$i_k = 10,0 \text{ кА/м}^2$	10,7
$i_k = 12,0 \text{ кА/м}^2$	9,6

Проведенные испытания на трение и износ показали, что при выбранных условиях опыта пара трения в основном прирабатывалась в течение  $\sim 20$  минут и при увеличении времени испытания момент трения и температура в зоне трения уменьшались незначительно (рис. 3).

Периодическое взвешивание роликов показало, что их износ незначительно изменялся при переустановке образца, а скорость износа сохранялась практически постоянной при увеличении времени испытания.

В результате выполненных исследований установлено (табл. 3), что после 144 часов испытаний покрытия, осажденные с использованием ИЕУ, изнашивались меньше, чем полученные без такого контура при оптимальных условиях электролиза ( $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ ,  $t_{\text{эл}} = 55^\circ \text{С}$ ). Более износостойкими оказались осадки, полученные при плотностях тока  $8,5\text{--}10,0 \text{ кА/м}^2$ .

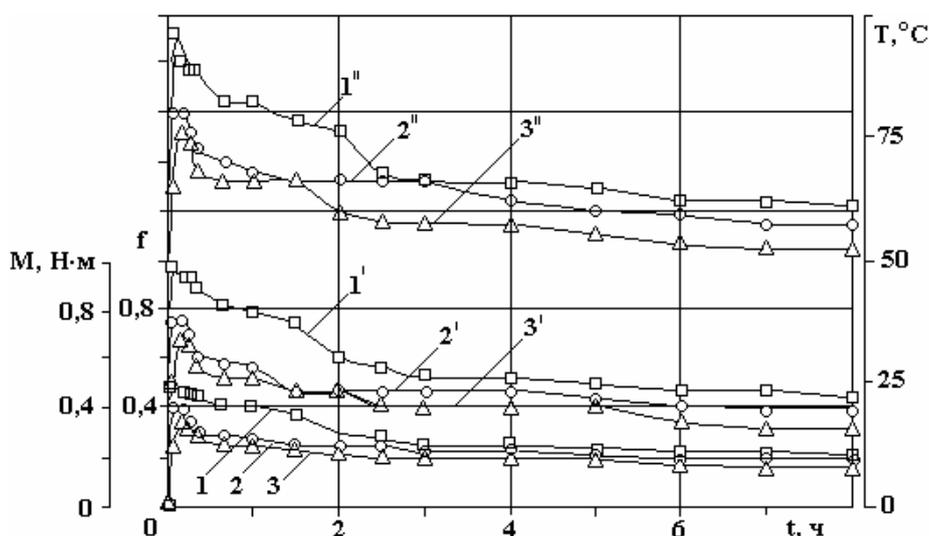


Рис. 3. Влияние условий осаждения на момент трения (1 – 3), коэффициент трения (1' – 3') и температуру вблизи зоны трения (1'' – 3''): 1 –  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ , без устройства; 2 –  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ , с устройством ( $C_{\text{он}}$ ,  $L_{\text{он}}$ ); 3 –  $i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$ , с устройством ( $C_{\text{он}}$ ,  $L_{\text{он}}$ )

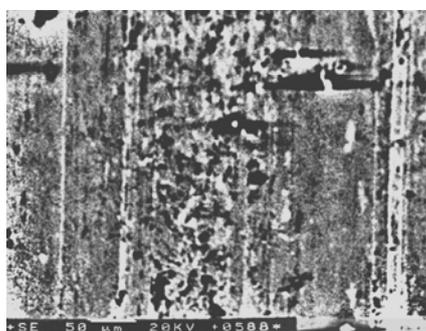
Определение величины износа контртела также показало, что оно меньше изнашивалось при трении с более износостойкими покрытиями.

Аналогичным образом изменялись коэффициент трения  $f$  и температура вблизи поверхности трения (табл. 3).

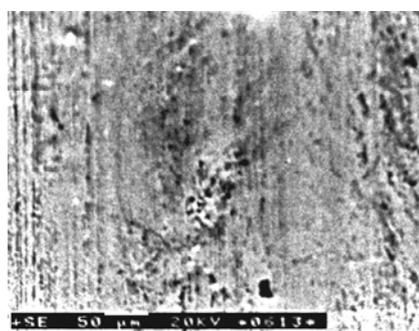
Изучение поверхности трения показало, что ее разрушение вызвано накоплением дефектов в поверхностном слое, которое в дальнейшем приводило к образованию продуктов износа. Глубина поражения поверхности, видимо, связана с размерами структурных элементов покрытия: более грубая поверхность трения наблюдалась у покрытий, полученных при  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$  без ИЕУ и  $i_k = 12,0 \text{ кА/м}^2$  с ИЕУ, и менее глубокие разрушения замечены на изношенных поверхностях покрытий, осажденных при  $i_k = 8,5\text{--}10,0 \text{ кА/м}^2$  с ИЕУ (рис. 4).

Таблица 3. Износ покрытий

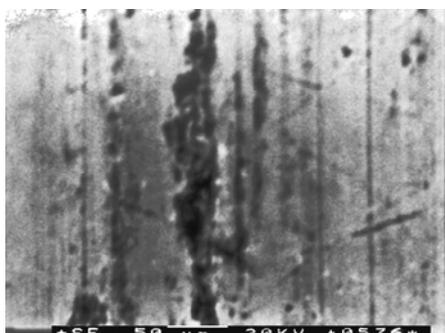
Условия осаждения	Износ покрытия, мг	Износ чугуна, мг	Коэффициент трения $f$	Температура в зоне контакта $t, ^\circ\text{C}$
$i_k = 5,5 \text{ kA/m}^2$	63,2	1391,9	0,42	62
С подключением ИЕУ ( $L = 0,119 \text{ мГн}, C = 0,024 \text{ Ф}$ ):				
$i_k = 5,5 \text{ kA/m}^2$	49,96	1085,3	0,38	58
$i_k = 8,5 \text{ kA/m}^2$	27,2	725,6	0,31	52
$i_k = 10,0 \text{ kA/m}^2$	33,8	991,7	0,33	55
$i_k = 12,0 \text{ kA/m}^2$	46,6	1032,5	0,37	57



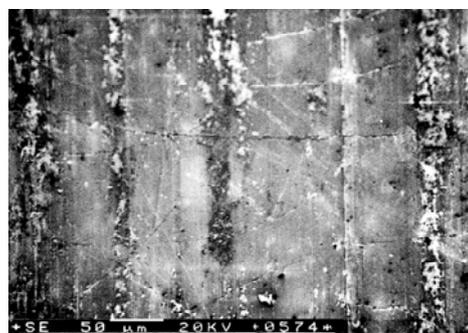
а



б



в



г

Рис. 4. Влияние условий осаждения на износ покрытий,  $C = 0,024 \text{ Ф}$ : а –  $i_k = 5,5 \text{ kA/m}^2$ , без устройства; б –  $i_k = 5,5 \text{ kA/m}^2$ , с устройством ( $L = 0,199 \text{ мГн}$ ); в – то же,  $i_k = 8,5 \text{ kA/m}^2$ ; г – то же,  $i_k = 10,0 \text{ kA/m}^2$

Приведенные данные также подтверждаются результатами измерения шероховатости этих поверхностей (табл. 4). Наименьшей шероховатостью обладали покрытия, полученные при  $8,5 \text{ kA/m}^2$  с ИЕУ ( $R_a = 0,09 \text{ мкм}, R_z = 0,6 \text{ мкм}$ ).

Для испытания покрытий в производственных условиях были нанесены хромовые покрытия на изнашивающиеся поверхности вала шестеренчатого насоса ТВ-11-25А, установленного для приготовления эмульсии из отходов производства подсолнечного масла, содержащей до 3% клетчатки. Насос работал до полной потери работоспособности. В результате выполненных исследований установлено, что покрытия, полученные при  $5,5 \text{ kA/m}^2$  в обычном режиме, изнашивались в 1,5 раза больше, чем покрытия, осажденные при этой же плотности тока и с подключением ИЕУ, и быстрее в два раза по сравнению с покрытиями, полученными при  $8,5 \text{ kA/m}^2$  с ИЕУ (рис. 5).

Таким образом, выполненные исследования показали, что параметры индуктивно-емкостного устройства оказывают существенное влияние на структуру и износостойкость электролитического хрома. Несмотря на то что при оптимальных параметрах устройства потенциал катода сдвигался в более положительную область, структура покрытий формировалась из более мелких кристаллических

агрегатов, что, возможно, связано с особенностью распределения тока на поверхности, которая, видимо, приводит к образованию большего количества зародышей, и они не разрастаются до больших размеров. Аналогичные результаты были получены и при осаждения с ИЕУ медных и никелевых покрытий [5, 6].

Таблица 4. Влияние индуктивно-емкостного устройства на шероховатость изношенных поверхностей покрытий

Условия осаждения	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм
$i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$	0,69	3,6
С подключением ИЕУ ( $L = 0,119 \text{ мГн}$ , $C = 0,024 \text{ Ф}$ ):		
$i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$	0,47	2,2
$i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$	0,09	0,6
$i_k = 10,0 \text{ кА/м}^2$	0,57	3,2
$i_k = 12,0 \text{ кА/м}^2$	0,67	3,8



Рис. 5. Результаты производственных испытаний покрытий, полученных при условиях электролиза: 1 – в обычном режиме,  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ ; 2 – с ИЕУ,  $i_k = 5,5 \text{ кА/м}^2$ ; 3 – то же,  $i_k = 8,5 \text{ кА/м}^2$

Формообразование однородной структуры покрытия, полученной с применением индуктивно-емкостного устройства, приводит к повышению износостойкости электролитического хрома.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ваграмян А.Т., Жемагорцяну М. Электроосаждение металлов и ингибирующая адсорбция. М.: Наука, 1969. 197 с.
2. Поветкин В., Ковенский И. Структура электролитических покрытий. М.: Металлургия, 1989. 136 с.
3. Гологан В.Ф., Бобанова Ж.И., Иваишу С.Х. Особенности процесса хромирования при использовании индуктивно-емкостного устройства // Электронная обработка материалов. 2008. № 4. С. 9–16.
4. Гологан В.Ф., Аждер В.В., Жавгуряну В.Н. Повышение долговечности деталей машин износостойкими покрытиями. Кишинев: Штиинца, 1979. 111 с.
5. Гологан В.Ф., Бобанова Ж.И., Иваишу С.Х., Попов В.А., Мазур В.А. Особенности процесса гальванических покрытий в случае применения однофазного источника питания со встроенным индуктивно-емкостным устройством // Электронная обработка материалов. 2007. № 2. С. 12–16.
6. Гологан В.Ф., Бобанова Ж.И., Иваишу С.Х., Мазур В.А., Пушкашу Б.М. Особенности влияния параметров индуктивно-емкостного устройства на процесс никелирования // Электронная обработка материалов. № 5. 2007. С. 4–8.

Поступила 26.02.08

## Summary

The experimental data received at various parameters of the inductance-capacitor device are presented by variation inductance  $L$  and capacity  $C$  under other identical conditions of electrolysis. It is possible to make essential impact on morphology, structure and wear resistance of plated chromium.