Влияние высокочастотного электромагнитного поля на свойства хромовых покрытий

А. Г. Анисович[a], В. В. Ажаронок[c], В. Ф. Гологан[b], М. К. Болога[b], Л. В. Бисюк[a] , Ж. И. Бобанова[b], С. Х. Ивашку[b], Л. Е. Кратько[c]

[a]*Физико-технический институт НАН Беларуси, ул. Купревича, 10, г. Минск, 220141, Республика Беларусь,*
[b]*Институт прикладной физики АН Молдовы, ул. Академией, 5, MD-2028, г. Кишинев, Республика Молдова, e-mail: vgologan@mail.ru*
[c]*Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости, 68, г. Минск, 220072, Республика Беларусь*

Представлены результаты влияния высокочастотной магнитно-импульсной обработки гальванических хромовых покрытий на их структуру. Показано, что степень влияния магнитно-импульсного воздействия зависит от условий осаждения покрытий, благодаря которым происходит существенное изменение исходной структуры и микротвердости покрытий.

УДК 621.35+621.9.047

Электролитическое хромирование широко распространено в промышленности благодаря высокому сопротивлению износу и коррозионностойкости осадков. Обладая повышенной твердостью, осадки хрома являются хрупким материалом, и в процессе трения на их поверхности возникают микротрещины, по краям которых происходят сколы покрытия. Интенсивность процесса зависит от условий трения [1]. Такие материалы можно отнести к полухрупким, поскольку образование микротрещин сопровождается незначительной пластической деформацией при вдавливании индентора [2]. Покрытия упрочняются незначительно, и в случае достижения номинального наклепа мельчайшие частицы хрома отделяются с поверхности [3]. Поэтому основной эффект от применения поверхностно упрочняющих технологий, например алмазного выглаживания, обеспечивается главным образом за счет формирования благоприятной шероховатости поверхности [4]. Эти свойства осадков обусловлены мелкокристаллической структурой, наличием остаточных напряжений и высокой плотностью дислокаций. Свойства покрытий, формируемых при электролизе, могут быть изменены в результате магнитно-импульсного воздействия, которое оказывает существенное влияние на структуру и физико-механические характеристики материалов [5, 6].

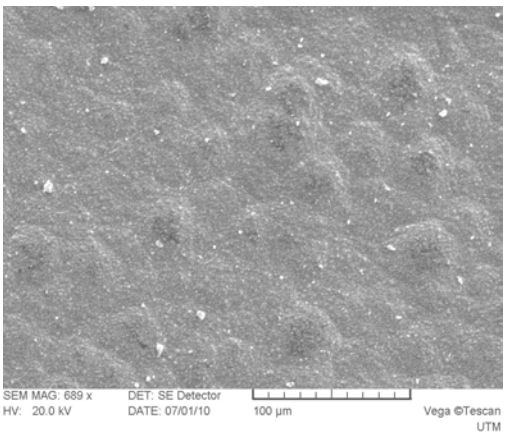
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения степени воздействия магнитно-импульсной обработки (МИО) образцов из стали Ст3 (диаметром 20 мм и высотой 10 мм) полированный торец покрывался в течение семи часов в универсальном электролите хромирования (CrO_3 – 250 г/л, H_2SO_4 – 2,5 г/л, температура электролита – 55^0C). Использовали однофазный с двухполупериодным выпрямлением и трехфазный источники питания мощностью 60 Вт, к ним подключалось последовательно в гальваническую цепь индуктивно-емкостное устройство (ИЕУ) (индуктивность L – 6,3 Гн, емкость C – 17600 мкФ), параметры которого выбраны на основе предварительных исследований. Покрытия осаждали при плотностях тока 55 и 85 А/дм^2. Высокочастотную магнитно-импульсную обработку проводили на экспериментальной установке Института физики НАН Беларуси в модулированном по амплитуде синусоидальном электромагнитном поле с частотой f = 5,28 МГц, амплитудные значения напряженностей магнитной и электрической составляющих поля достигали 17960 В/м и 835 А/м соответственно. Обработку проводили при двух импульсах (условия выбраны по результатам предварительных исследований) согласно циклограмме [7]. Образец размещали в рабочей зоне индуктора покрытием вверх. Морфологию и структуру покрытий изучали на металлографическом микроскопе МИКРО-200, электронной модели TESCAN, а также рентгеновских установках PDF-2 и DRON-3. Для определения микротвердости применяли микротвердомер ПМТ-3.

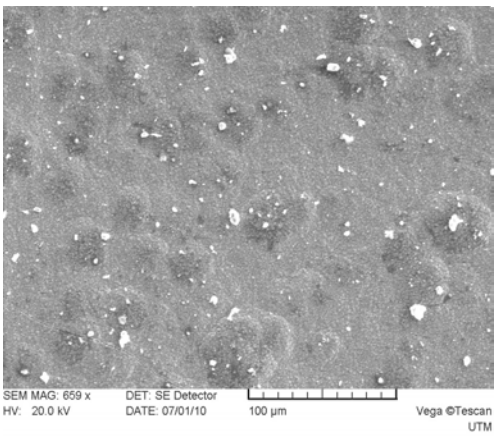
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение морфологии покрытий, осажденных при использовании однофазного источника питания при плотности тока 55 А/дм^2 (I = = 1,65 А), показало, что на поверхности покрытия формируются сфероидальные агрегаты, количество которых при подключении ИЕУ увеличивается, что свидетельствует о возрастании количества центров кристаллизации, с преоблада-

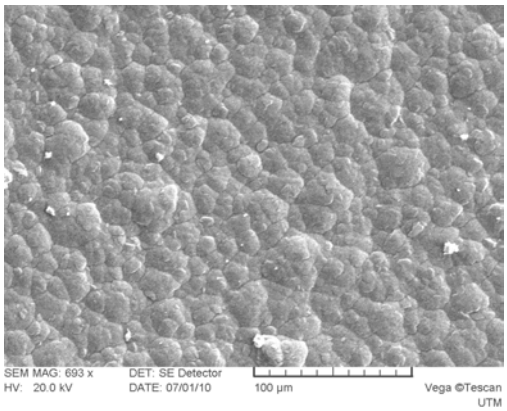
© Анисович А.Г., Ажаронок В.В., Гологан В.Ф., Болога М.К., Бисюк Л.В., Бобанова Ж.И., Ивашку С.Х., Кратько Л.Е.,
Электронная обработка материалов, 2013, **49**(2), 12–17.



(а)

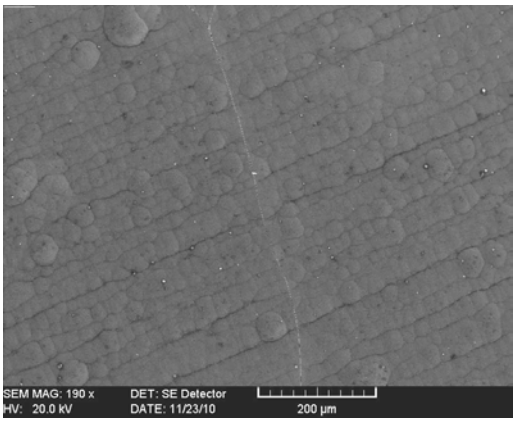


(б)

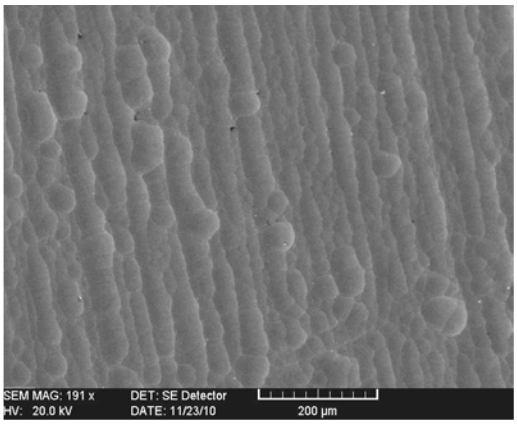


(в)

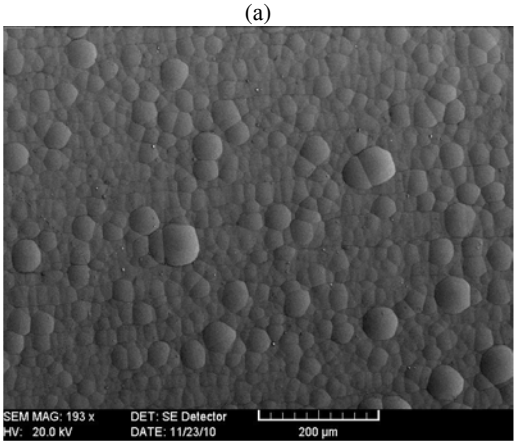
Рис. 1. Влияние условий осаждения на морфологию хромовых покрытий (однофазный источник питания): (а) – без ИЕУ, i_k – 5,5 кА/м^2 (обр. 1); (б) – с ИЕУ, i_k – 5,5 кА/м^2 (обр. 3); (в) – с ИЕУ, i_k – 8,5 кА/м^2 (обр. 4, табл. 1).



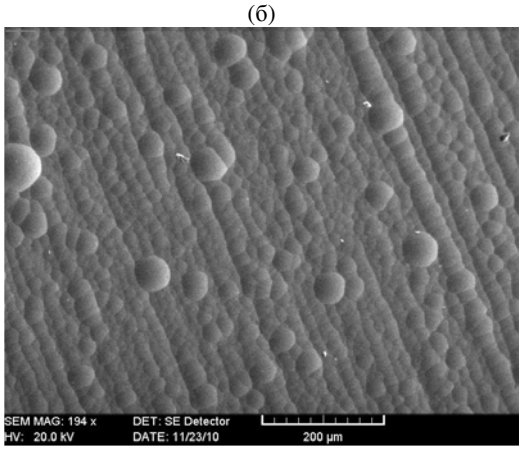
(а)



(б)



(в)

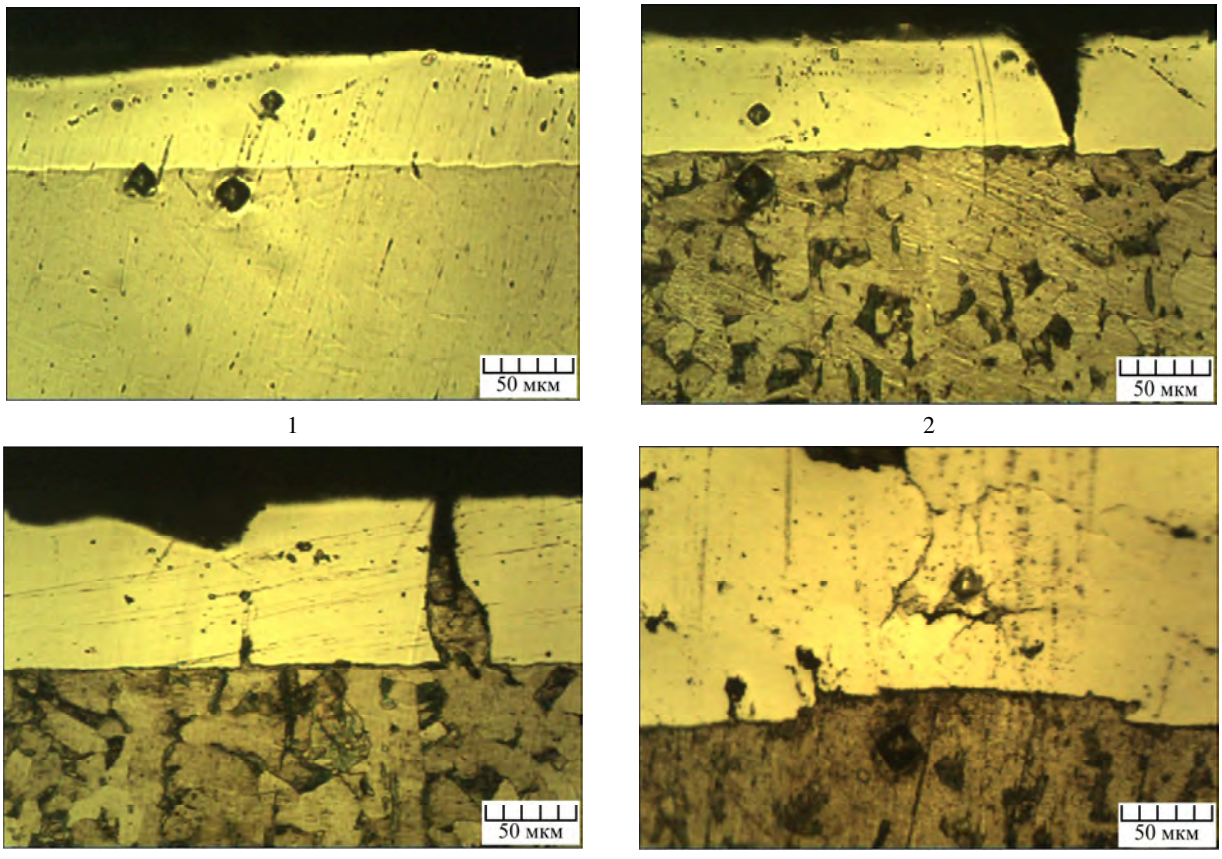


(г)

Рис. 2. Морфология осадков хрома (трехфазный источник питания): (а) – i_k – 5,5 кА/м^2 (обр. 5); (б) – i_k – 8,5 кА/м^2 (обр. 6); (в) – с ИЕУ, i_k – 5,5 кА/м^2 (обр. 7); г – с ИЕУ, i_k – 8,5 кА/м^2 (обр. 8).

Таблица 1. Влияние условий осаждения и МИО на микротвердость покрытий

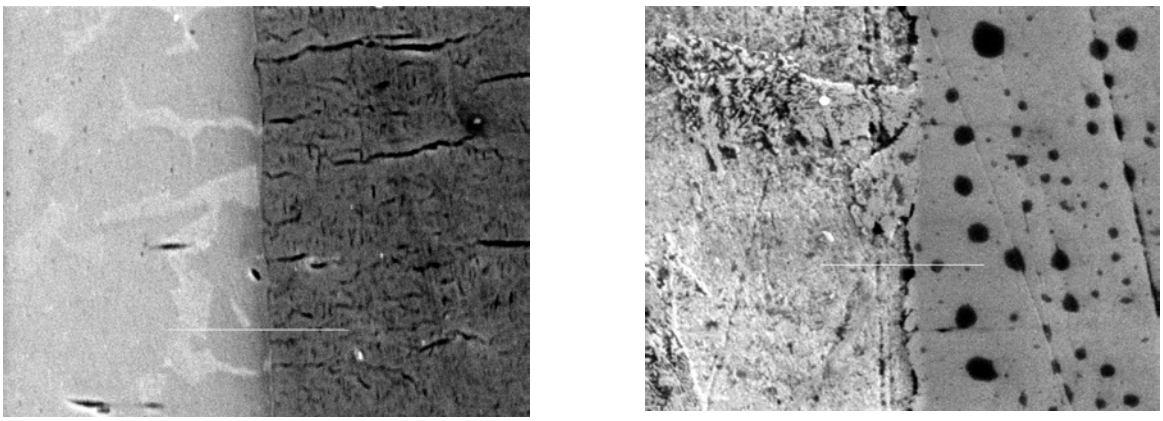
№ Образца	Условия электролиза	Микротвердость, МПа		
		Однофазный источник питания	Трехфазный источник питания	После МИО
1	i_k 5,5 кА/м^2	5320		4300
2	i_k 5,5 кА/м^2 $t_{эл}$ 40^{0}С	4300		4650
3	i_k 5,5 кА/м^2, ИЕУ	6270		3900
4	i_k 8,5 кА/м^2, ИЕУ	4660		3100
5	i_k 5,5 кА/м^2		6330	6200
6	i_k 8,5 кА/м^2		7120	6700
7	i_k 5,5 кА/м^2, ИЕУ		9200	7300
8	i_k 8,5 кА/м^2, ИЕУ		8770	7000



1 2

3 4

Рис. 3. Влияние МИО на границу раздела композиции сталь-покрытие: 1 – исходное состояние (обр. 2); 2, 3 – после МИО (обр. 2); 4 – после МИО (обр. 4).



(а) (б)

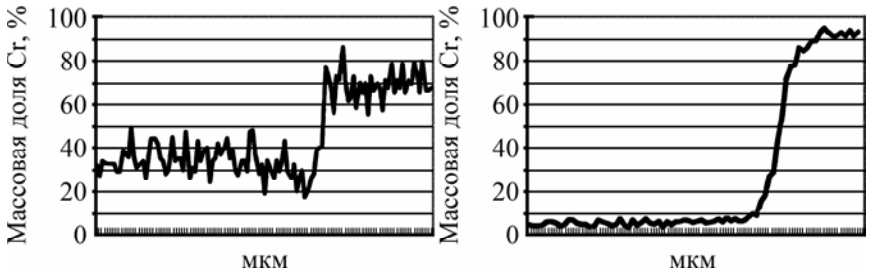
Рис. 4. Структура осадков хрома (обр. 4, х312): (а) – исходное состояние; (б) – после МИО.

Таблица 2. Остаточные напряжения в покрытиях

№ образца	Остаточные напряжения, МПа			
	Исходные значения		После МИО	
	По линии {200}	По линии {211}	По линии {200}	По линии {211}
5	1270,5	534,7	1270,5	-675,9
6	1546,7	-675,9	1546,7	-272,4
7	2375,3	-1079,5	1270,5	131,1
8	718,1	-272,4	1546,7	-474,1

Таблица 3. Размеры высоты линий

№ образца	(110) Н, мм		(200) Н, мм		(211) Н, мм	
	Исход. сост.	После МИО	Исход. сост.	После МИО	Исход. сост.	После МИО
5	–	–	26	26	10	7
6	7,7	–	32	27	23	18
7	7,7	–	38	30	24	23
8	5,0	4	33	32	29	21



(а) (б)

Рис. 5. Распределение хрома на границе подложка-покрытие в исходном состоянии (а), после МИО (б).

Таблица 4. Содержание элементов в стали на расстоянии 10 мкм от зоны раздела основа-покрытие

Элементы	Массовые % в исходном состоянии	Массовые % после МИО
Cr	20,0	2,11
Fe	75,27	97,89

Таблица 5. Параметры решетки

№ образца	Исходные значения		После МИО	
	Параметры решетки	Объем элементарной ячейки	Параметры решетки	Объем элементарной ячейки
По линии (200)				
5	2,8802	23,892	2,8802	23,892
6	2,8786	23,8525	2,8786	23,8525
7	2,8786	23,8525	2,8802	23,892
8	2,8786	23,8525	2,8794	23,8722
По линии (211)				
5	2,8825	23,9506	2,886	24,0377
6	–	–	2,8848	24,0086
7	2,886	24,0377	–	–
8	2,8831	23,9651	2,8854	24,0232

нием меньших размеров агрегатов (поверхность менее шероховатая). У покрытий, осажденных при i_k = 85 А/дм^2 (I = 2,58 А) с ИЕУ, формируются более четкие агрегаты со скругленными гранями (рис. 1).

При осаждении покрытий с использованием трехфазного источника тока морфология осадков существенно отличалась от вышерассмотренных (рис. 2). Более однородное формирование покрытия установлено при плотности тока 55 А/дм^2 с ИЕУ (рис. 2в). Наименьшие размеры агрегатов наблюдались на поверхности покрытий, осажденных при 85 А/дм^2 с ИЕУ (рис. 2г). У покрытий, полученных при i_k–5,5 кА/м^2 без ИЕУ, образуются микротрещины между отдельными полосами осаждения хрома (рис. 2а).

Выбранные условия электролиза оказали существенное влияние на микротвердость покрытий (табл. 1). Большей микротвердостью обладают покрытия, полученные с использованием трехфазного источника питания, что, видимо, связано с величинами пульсаций после выпрямления и амплитудно-частотными характеристиками переменных составляющих тока [8].

В результате МИО поверхность покрытий, видимая в растровом электронном микроскопе, не претерпела существенных изменений. Измерение микротвердости в середине образца показало, что только у покрытий с наименьшей исходной твердостью (Hμ = 4300 МПа) произошло их упрочнение (Hμ = 4650 МПа), у остальных она уменьшалась. Наибольшее влияние МИО оказывает на покрытия, которые в исходном состоянии обладали большей микротвердостью (обр. 3, 7, 8, табл. 1), что, возможно, вызвано отрывом дислокаций от точек их закрепления, и это сказалось на пластических свойствах осадков хрома [9].

Изучение структуры поперечных шлифов показало, что после МИО поверхность пограничной зоны из-за низкой твердости стали Ст3 деформировалась неравномерно, что приводило к образованию трещин в покрытии, выдавливанию подложки в образовавшиеся трещины, а также вдавливанию покрытия в основу (рис. 3). Для устранения деформаций основа должна обладать большей твердостью, так как деформационные изменения в зоне раздела покрытие-основа оказывают существенное влияние на циклическую прочность композиции [10].

Существенно изменяется структура покрытия после МИО (рис. 4). В исходном состоянии покрытия обладали большим количеством микротрещин и других дефектов (рис. 4а), а после обработки образуются поры, которые свидетельствуют о значительной пластической деформации покрытия. Возникновения пор можно избежать подбором условий МИО. С учетом полученных результатов влияния МИО на структуру осадков стало целесообразным определение напряженного состояния покрытий.

Макронапряжения определяли по формуле [11]:

$$G = \frac{E}{\mu}\operatorname{ctg}\theta\Delta\theta,$$

где E и μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона; θ – положение максимума линии (град.); $\Delta\theta$ – смещение максимума относительно эталона (град.). В нашем случае E = 250000 МПа; μ = 0,25, положение линии на эталонном спектре (град.) – 64,578 (справочные данные) [11]; излучение – меди.

Оказалось, что остаточные напряжения существенно изменяются в зависимости от условий осаждения и МИО (табл. 2). Значительное отличие наблюдается по линиям {200} и {211}, что может быть связано с текстурой покрытий [12].

Фазовый анализ показал, что при осаждении получена αCr фаза, которая сохранилась и после МИО. Однако дифрактограммы заметно отличаются у покрытий, полученных при выбранных условиях электролиза: высота линий (110), (200), (211) изменяется, а в отдельных образцах отсутствует линия (110) (табл. 3). Микрохиманализ покрытий свидетельствует о присутствии в покрытии кислорода, что, видимо, вызвано включением в осадок окиси хрома Cr_2O_3 из коллоидной пленки [13]. В зоне раздела установлено изменение концентрации хрома в стали Ст3 в результате диффузии в сталь (рис. 5). На глубине 10 мкм МИО способствует значительному уменьшению количества хрома (табл. 4).

В результате определения параметров решетки и объема элементарной ячейки установлено, что условия электролиза и МИО не оказывают существенного влияния на их значения (табл. 5).

Таким образом, установлено, что при выбранных условиях экспериментов магнитно-импульсная обработка заметно влияет на структуру, микротвердость и остаточные напряжения покрытий. Благодаря эффекту электропластичности в процессе воздействия МИО происходит деформация покрытия, которая вызывает ликвидацию микротрещин и других микродефектов, а также формирование пористого покрытия. При МИО мягкая подложка претерпевает изменения в зоне раздела основа-покрытие. В основе, вблизи границы раздела, также изменяется концентрация хрома, продиффундировавшего при электролизе.

Об изменении структуры покрытия свидетельствует и фазовый анализ осадков. Однако влияние МИО на параметры решетки не установлено. Выполненные исследования свидетельствуют, что магнитно-импульсная обработка влияет в основном на факторы, которые играют роль при пластической деформации покрытия и связаны с формированием осадка при электролизе. В зависимости от исходной микротвердости после МИО она может увеличиваться или уменьшаться. Поэтому варьированием условиями электролиза и МИО можно обеспечить формирование новой структуры и физико-механических свойств осадков, существенно отличающихся от свойств исходных покрытий.

Исследования профинансированы по гранту в рамках Программы сотрудничества «БРФФИ-АНМ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Gologan V.F., Eyre T.S. Friction and Wear of Some Engineering Materials Against Hard Chromium Plating. *Wear*. 1974, **28**(1), 107–114.
2. Гологан В.Ф. Влияние условий электролиза на физико-механические свойства твердых износостойких покрытий. *Электронная обработка материалов*. 1982, (5), 37–40.
3. Гаркунов Д.Н. Старосельский А.А. Свойства электролитического хрома и области его применения. *Твердые износостойкие электролитические покрытия в машиностроении и при ремонтных работах*. М.: МДНТП, 1966. Т.1, 13–16.
4. Хворостухин Л.А., Машков В.Д., Торбачев В.А., Ильин Н.Н. *Обработка металлопокрытий выглаживанием*. М.: Машиностроение, 1980. 64 с.
5. Спицин В.И., Троицкий О.А. *Электропластическая деформация металлов*. М.: Наука, 1985. 159 с.
6. Анисович А.Г. *Закономерности процессов структурообразования и термодинамический аспект организации структуры металлов нестационарного энергетического воздействия*. Автореферат дисс. докт. физ.-мат. наук. Минск, 2005. 32 с.
7. Анисович А.Г., Румянцева И.Н., Марукович Е.И., Ажаронок В.В., Гончарук С.В. Изменение структуры чугуна С4-35 в модульном по амплитуде высокочастотном магнитном поле. *Электронная обработка материалов*. 2009, **45**(2), 7–36.
8. Gologan V.F., Bobanova Zh.I., Bukar' S.V., Ivashku S.V., Unguryanu V.N. The Use of Induction-capacitance Devices in Electrotechnical Processes. *Surf. Eng. Applied Electrochem*. 2011, **47**(3), 284–289.
9. Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Громов В.Е. Изменение микротвердости технически чистого алюминия А85 в импульсном магнитном поле. *Вестник Челябинского государственного университета*. 2010, **12**(7), 21–22.
10. Гологан В.Ф., Ейре Т.С., Дутта К.К. Особенности влияния гальванических покрытий железа и сплава железо-никель на прочность стали 45 при статических и циклических нагружениях. *Электронная обработка материалов*. 1981, (3), 33–37.
11. Горелик С.С. и др. *Рентгеноструктурный и электронно-оптический анализ*. М.: Металлургия, 1977. 584 с.
12. Кочергин С.М., Леонтьев А.В. *Образование текстуры при электрокристаллизации металлов*. М.: Металлургия, 1973. 184 с.
13. Шлугер М.А., Тока Л.Д. *Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник*. Т.1. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

Поступила 19.03.12

Summary

The results of the effect of high-frequency magnetic-pulse treatment of galvanic chromium coatings on their structure are presented. It is shown that the degree of the influence of magnetic-pulse action depends on the conditions of deposition of coatings: a substantial change in the initial structure and microhardness of the coatings occur.