

ЖУРНАЛ РОССИЙСКОГО ОБЩЕСТВА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ (РОНКТД)

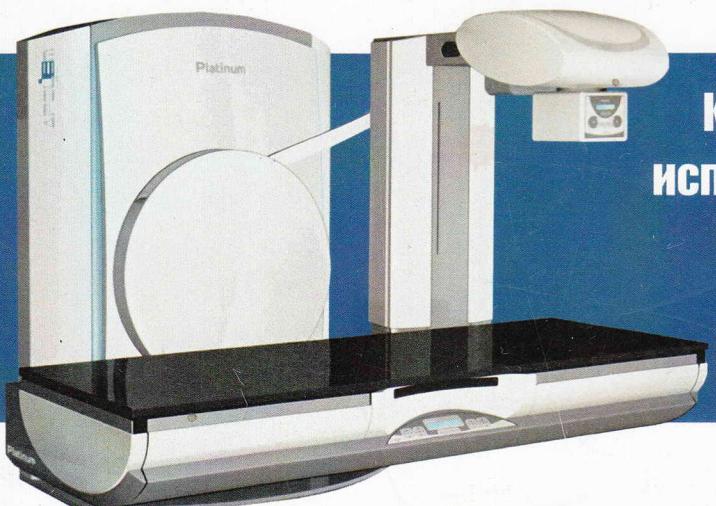
# Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS



Спектр

Издательский дом

7(205) 2015  
июльНИИИИ МПО "СПЕКТР"  
RII MSIA "SPECTRUM"Универсальный телеуправляемый  
рентгенодиагностический комплексКРД-СМ 50/125-1 "СПЕКТРАП"  
исполнение "Baccara-Platinum"

Обеспечивает непревзойденное удобство работы, в том числе при рентгенохирургии, в сочетании с прекрасными техническими характеристиками.

В комплект поставки входят:

- телеуправляемый поворотный стол-штатив BACCARA (исполнение Platinum);
- генератор рентгеновский (устройство рентгеновское питающее) мощностью 50,65 или 80 кВт;
- цифровая система с плоскопанельным детектором на основе аморфного кремния, активированного CsI, по заказу DICOM-принтер.

Возможно запоминание нескольких типичных положений стола-штатива в сочетании с определенными установками генератора для часто проводимых исследований. Возможно одновременно выполнять несколько движений. Низкий уровень шума при работе в сочетании с аудио-визуальными эффектами (опция) для релаксации пациентов (прежде всего, детей) позволяет проводить исследования в максимально комфортной обстановке.

Видеокамера, встроенная в рентгеновскую диафрагму, обеспечивает достоверное оперативное наблюдение за пациентом и облегчает прицеливание.

СПЕКТРАП  
SPECTRAP

119048, Россия, Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1. Телефон (499) 245 40 00, факс (499) 933 02 99

УДК 669.539.2

DOI: 10.14489/td.2015.07.pp.041-046

**А. В. Калмыков, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский, С. Г. Бодров**  
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)  
E-mail: info@plasmacentre.ru

# КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДАЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

При нанесении тонкопленочных покрытий с использованием физического и химического осаждения из паровой фазы важной характеристикой процессов является равномерность наносимого покрытия по толщине. В процессе химического осаждения покрытий методом финишного плазменного упрочнения – безвакуумного и бескамерного нанесения нанокомпозитных покрытий с применением жидких металлоорганических соединений и активации электродуговой плазмой контроль за толщиной наносимого покрытия может быть осуществлен с использованием получаемой информации об электрических характеристиках самих покрытий в процессе их нанесения. Предложен неразрушающий метод контроля толщины и качества покрытий путем измерения их сопротивления с применением источника постоянного тока, а также с использованием более сложной измерительной схемы с дополнительным источником переменного тока, обеспечивающим определение компонентов комплексного сопротивления участка цепи, включающего покрытие.

**Ключевые слова:** покрытие, осаждение, упрочнение, толщина покрытия, электрические характеристики.

**A. V. Kalmykov, S. A. Ermakov, P. A. Topolyanskiy, S. G. Bodrov**  
(Saint Petersburg State Polytechnic University)

## MONITORING THE ELECTRICAL PERFORMANCE OF THE THIN-FILM COATINGS DEPOSITED IN FINISHING PLASMA HARDENING PROCESS

One of the main characteristics of the thin-film coatings laid by physical and chemical vapor deposition is evenness of its thickness. During the process of chemical deposition in finishing plasma hardening method – nonaerated and beadless nanocomposite covering with PECVD by cold atmospheric plasma – the coating thickness monitoring can be performed by usage of the information on the electrical performance of the given coating acquired during the covering process. It is suggested a method of nondestructive control for monitoring the coating thickness and quality by measurement of its resistance with DC power supply, as well as by a more complex measurement design with an additional AC power supply that allows to define the components of the complex resistance in the circuit unit including the coating.

**Keywords:** coating, deposition, hardening, coating thickness, electrical performance.

Нанесение тонкопленочных покрытий на детали машин, инструмент, технологическую оснастку является наиболее эффективным средством для многократного повышения их надежности и долговечности. В мировой практике в качестве материалов покрытий используются неметаллические соединения на основе оксидов, карбидов, боридов и нитридов. Применение износостойких диэлектрических покрытий является принципиальным с точки зрения получения максимальных трибологических и антиадгезионных свойств. При этом изучению электрических свойств таких покрытий уделяется повышенное внимание [1 – 3].

В процессе плазмохимического осаждения покрытий методом финишного плазменного упрочне-

ния (ФПУ) обеспечивается нанесение на изделие аморфного диэлектрического материала на основе оксикарбонитридов кремния и бора.

В работе [4] указано, что измерение компонентов комплексного сопротивления между поверхностью покрытия и металлической подложкой, подвергаемой обработке в процессе ФПУ, позволяет получить информацию о толщине покрытия и что комплексное сопротивление покрытия в диапазоне частот до десятков килогерц представляет собой параллельное соединение емкости  $C_d$  и сопротивления  $r_d$ . При этом отмечено, что их значения зависят от химического состава покрытия и его толщины  $d$ . В указанных экспериментах применялась электрическая цепь, состоящая из источника пере-

менного напряжения и добавочного сопротивления, и исследовался участок покрытия с площадью, соответствующей площади контакта измерительного датчика.

Емкость покрытия  $C_d$  определялась емкостью плоского конденсатора с расстоянием между обкладками  $d$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , связанной с характеристиками материала покрытия. Сопротивление покрытия  $r_d$  в первом приближении прямо пропорционально толщине покрытия  $d$ , величина которой может достигать порядка нескольких микрометров. Определенное таким образом значение толщины покрытия ( $d \geq 1$  мкм) хорошо соответствовало результатам прямых измерений (с разрушением самого покрытия). Измерение характеристик более тонких, с толщиной менее 1 мкм, покрытий предложенным способом представляется трудоемким. Кроме того, использование контактного датчика при движении плазматрона и осаждении покрытия на неплоские поверхности является сложной задачей.

Обеспечить контроль толщины покрытия в процессе его нанесения до сих пор не удавалось. В работах [5, 6] предложено использовать обработку токового сигнала, протекающего по цепи плазматрон – поверхность покрытия – металлическая подложка, при наличии дополнительного источника ЭДС. Однако в этих работах не проводились детальные исследования эквивалентной электрической цепи, включающей в себя относящиеся как к плазме, так и к покрытию компоненты, что и являлось целью настоящего исследования. Первой задачей ставился анализ выполненных в работах [5, 6] экспериментов для выработки корректного процесса измерений с использованием дополнительного источника постоянного напряжения. Второй задачей являлась оптимизация измерительной схемы в целях получения электрического сигнала, пропорционального толщине покрытия, и проведение соответствующих экспериментов.

### Анализ ранее полученных результатов

На рис. 1 приведена схема измерений с использованием дополнительного источника ЭДС [5]. Технологический режим функционирования оборудования соответствовал оптимальному для осаждения покрытия. При этом подача реагентов для осаждения покрытия не осуществлялась.

В режиме замыкания анода на деталь посредством внешнего сопротивления  $R_1$  (переключатель на рис. 1 находится в нижнем положении) значения напряжения между анодом плазматрона и обрабатываемой поверхностью детали  $U_i$  соответствовали

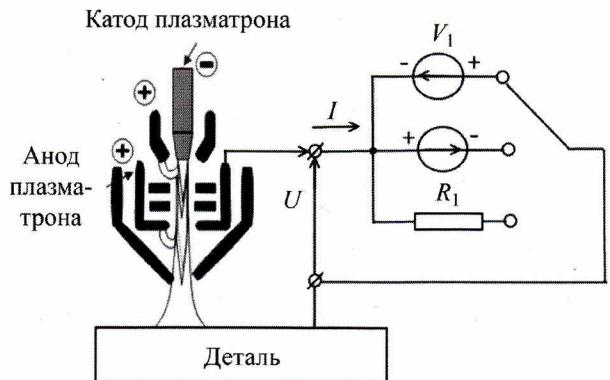


Рис. 1. Схема измерений электрических характеристик на постоянном токе:

$V_1$  – напряжение дополнительного источника ЭДС;  $R_1$  – токоограничивающее сопротивление;  $U$  – напряжение на аноде плазматрона относительно детали;  $I$  – ток в измерительной цепи

согласно закону Кирхгофа значениям  $U_i^* = I_i R_1$  (табл. 1).

Здесь и далее символ « $i$ » используется для обозначения режима замыкания в отсутствии дополнительного источника ЭДС. Расстояние  $l$  от среза сопла плазматрона до детали в описываемых экспериментах изменялось в диапазоне 5...30 мм.

При подключении дополнительного источника ЭДС  $V_1$  отрицательным зажимом к аноду (переключатель находится в верхнем положении, режим «–») суммарное падение напряжения в цепи  $U^* = U + IR_1$  примерно соответствуют величине  $V_1$  (табл. 2).

При переполосовке дополнительного источника (к аноду подключается положительный зажим, переключатель переводится в среднее положение) в режиме «+» напряжение  $U$  на аноде становилось равным  $V_1$ , а ток в цепи  $I = I_+$  резко уменьшался. В табл. 3 приведены результаты его измерений.

### 1. Ток $I_i$ и напряжение $U_i$ в режиме замыкания анода на деталь и расчетные значения $U_i^*$ в зависимости от расстояния $l$ от среза сопла плазматрона до детали

| $l$ , мм | $I_i$ , мА | $U_i$ , В | $U_i^*$ , В |
|----------|------------|-----------|-------------|
| 5        | 13,6       | 3,9       | 3,7         |
| 10       | 9,4        | 2,7       | 2,5         |
| 15       | 7,4        | 1,7       | 2,0         |
| 20       | 3,3        | 0,7       | 0,9         |
| 25       | 1,9        | 0,6       | 0,5         |
| 30       | 0,8        | 0,2       | 0,2         |

**2. Ток и напряжение в режиме подключения дополнительного источника отрицательным зажимом к аноду (режим «-») и расчетные значения  $U^*$ ,  $(I - I_i)$ ,  $R$ ,  $V$  в зависимости от расстояния  $l$  от среза сопла плазматрона до детали**

| $l$ ,<br>мм | $V_1 = 10$ В |             |              |                   |              |            | $V_1 = 20$ В |             |              |                   |              |            | $V_1 = 30$ В |             |              |                   |              |            |
|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------------|--------------|------------|--------------|-------------|--------------|-------------------|--------------|------------|--------------|-------------|--------------|-------------------|--------------|------------|
|             | $I$ ,<br>мА  | $-U$ ,<br>В | $U^*$ ,<br>В | $I - I_i$ ,<br>мА | $R$ ,<br>кОм | $V$ ,<br>В | $I$ ,<br>мА  | $-U$ ,<br>В | $U^*$ ,<br>В | $I - I_i$ ,<br>мА | $R$ ,<br>кОм | $V$ ,<br>В | $I$ ,<br>мА  | $-U$ ,<br>В | $U^*$ ,<br>В | $I - I_i$ ,<br>мА | $R$ ,<br>кОм | $V$ ,<br>В |
| 5           | 35,5         | -0,8        | 8,8          | 21,9              | 0,19         | 6,3        | 56,1         | 3,6         | 20,8         | 42,5              | 0,2          | 6,4        | 83,3         | 6,9         | 29,4         | 69,7              | 0,16         | 5,9        |
| 10          | 23,3         | 3,3         | 9,5          | 13,9              | 0,45         | 6,8        | 27,2         | 12,1        | 19,4         | 17,8              | 0,85         | 10,5       | 53,0         | 16,0        | 30,3         | 43,6              | 0,42         | 6,5        |
| 15          | 13,6         | 5,8         | 9,5          | 6,2               | 1,33         | 11,8       | 16,7         | 15,0        | 20,2         | 9,3               | 1,88         | 15,9       | 19,7         | 24,3        | 29,6         | 12,3              | 2,16         | 18,0       |
| 20          | 10,2         | 7,3         | 10,1         | 6,9               | 1,17         | 4,6        | 11,2         | 16,5        | 19,1         | 7,9               | 2,26         | 8,4        | 12,7         | 26,5        | 29,9         | 9,4               | 2,92         | 10,5       |
| 25          | 5,8          | 8,3         | 9,9          | 3,9               | 2,27         | 4,8        | 7,9          | 17,6        | 19,7         | 6,0               | 3,06         | 6,3        | 9,2          | 27,6        | 30,1         | 7,3               | 3,84         | 7,8        |
| 30          | 2,7          | 9,3         | 10,0         | 1,9               | 5,03         | 4,2        | 3,6          | 18,9        | 19,9         | 2,8               | 6,87         | 5,7        | 4,5          | 28,8        | 30,0         | 3,7               | 7,84         | 6,5        |

Объяснение полученных экспериментальных результатов авторами работы [5] не было приведено. Покажем, что отмеченный ход зависимостей измерительного тока от условий экспериментов объясняется в предположении, что электрические свойства плазмы описываются присущим самой плазме источником ЭДС постоянного тока  $V$  и ее сопротивлением  $R$ . Соответствующие этой модели эквивалентные электрические схемы приведены на рис. 2.

Зависимость  $I_i$  от  $V$  согласно закону Ома определяется соотношением

$$I_i = V / R^*,$$

где  $R^* = R + R_1$  (рис. 2, а)), а

$$I = V / R + V_1 / R^* = I_i + V_1 / R^* \text{ (рис. 2, б),}$$

откуда  $R^* = V_1 / (I - I_i)$ ;  $R = R^* - R_1$ ;  $V = I_i R^*$ .

Соотношения написаны в предположении, что величины  $V$  и  $R$  сохраняются при переходе от режима « $i$ » к режиму « $-$ ». Полученные значения

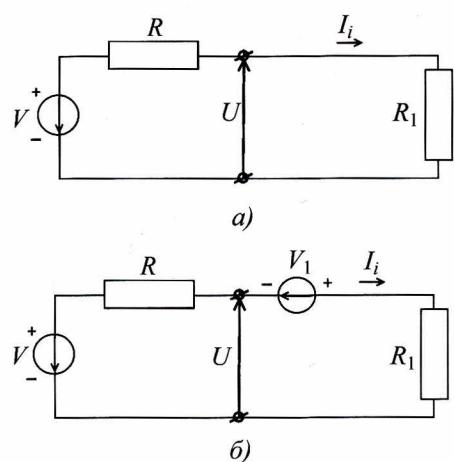
**3. Ток  $I_+$  в режиме подключения дополнительного источника положительным зажимом к аноду в зависимости от расстояния  $l$  от среза сопла плазматрона до детали**

| $l$ , мм | $I_+$ , мА, при напряжении |              |              |
|----------|----------------------------|--------------|--------------|
|          | $V_1 = 10$ В               | $V_1 = 20$ В | $V_1 = 30$ В |
| 5        | 0,04                       | 0,06         | 0,08         |
| 10       | 0,02                       | 0,03         | 0,03         |
| 15       | 0,02                       | 0,03         | 0,03         |
| 20       | 0,01                       | 0,02         | 0,02         |
| 25       | 0,01                       | 0,01         | 0,02         |
| 30       | 0,01                       | 0,01         | 0,01         |

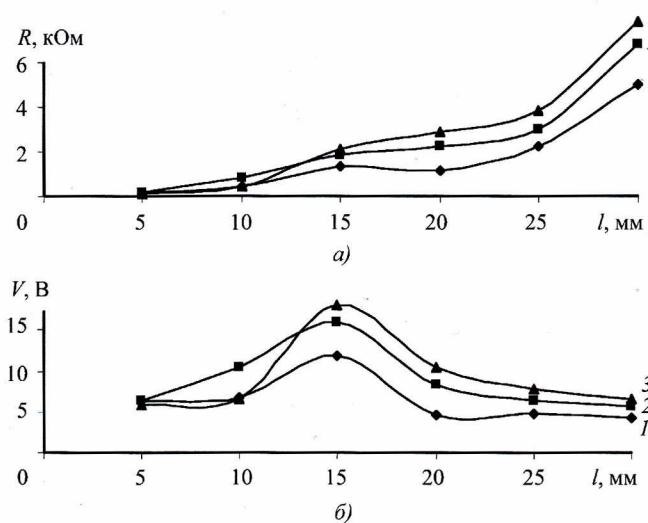
$(I - I_i)$ ,  $R$  и  $V$  приведены в табл. 2. На рис. 3 представлены зависимости расчетных значений  $R$  и  $V$  от  $V_1$  для различных расстояний  $l$ .

Отметим, что сам процесс ФПУ проводится при вполне определенном и оптимальном с точки зрения технологии значении расстояния  $l$  от среза сопла плазматрона до детали, которое находится в пределах 10...15 мм.

При переполюсовке источника ЭДС в режиме «+» оценка сопротивления плазмы  $R_+$ , проведенная с использованием эквивалентной электрической схемы, дает величину  $R_+$  в пределах  $R_+ = 100...600$  кОм. Вследствие малой точности этот режим как неинформативный следует исключить из рассмотрения, однако наблюдаемый эффект «вентильной» проводимости подтверждает предположение о наличии в плазме внутреннего источника ЭДС. Отметим, что приведенные в табл. 2 расчетные значения  $V$  не



**Рис. 2. Эквивалентные электрические схемы измерительной цепи при использовании дополнительного источника постоянного тока:**  
а – режим « $i$ »; б – режим « $-$ »



**Рис. 3. Зависимости параметров плазмы при различных значениях  $V_1$  ЭДС дополнительного источника постоянного тока:**  
а – зависимость расчетных значений  $R$  от величины  $l$ ;  
б – зависимость расчетных значений  $V$  от величины  $l$ ;  
1 –  $V_1 = 10$  В; 2 –  $V_1 = 20$  В; 3 –  $V_1 = 30$  В

противоречат природе электрической дуги. Они не превышают межэлектродное напряжение плазматрона (36 В) за вычетом суммы приэлектродных падений напряжения (около 10 В).

В работе [5] также описаны результаты экспериментов по измерению аналогичных электрических характеристик в процессе нанесения покрытия (режим плазматрона с подачей реагентов). В указанных экспериментах деталью служил цилиндрический прут диаметром 40 мм, изготовленный из стали У8, предварительно прогретый до температуры порядка 70 °C. Покрытие наносили в виде кольца на цилиндрическую поверхность, осевого перемещения плазматрона не было. Расстояние  $l$  от среза сопла плазматрона до детали составляло  $l = 10$  мм. Напряжение дополнительного источника  $V_1 = 20$  В. В начале процесса ФПУ ток в измерительной цепи составлял  $I = 34$  мА, через 1 мин он уменьшался до  $I = 20$  мА, а еще через 1 мин до  $I = 10$  мА.

Для оценки можно считать, что значение суммарной ЭДС составляет  $V_\Sigma = V_1 + \langle V \rangle = 28$  В, а усредненное сопротивление плазмы  $\langle R \rangle = 0,6$  кОм. Значение  $R_1$ , как и во всех описанных в работе [5] экспериментах, составляет  $R_1 = 0,27$  кОм. Суммарное сопротивление измерительной цепи  $R_\Sigma = V_\Sigma / I$ . Указанное сопротивление состоит из суммы известных сопротивлений  $\langle R \rangle$ ,  $R_1$  и сопротивления покрытия  $r_d$ , подлежащего расчету,  $R_\Sigma = \langle R \rangle + R_1 + r_d$ . В силу относительно малой величины  $R_1$  результа-

ты подобных измерений не позволяют провести надежную оценку сопротивления, а следовательно, и толщины наносимого покрытия.

В работе [6] описаны результаты экспериментов по контролю процесса ФПУ в различных режимах. Анализ результатов позволяет отметить, что электрические свойства плазмы описываются присущим самой плазме источником ЭДС постоянного тока  $V$  и ее сопротивлением  $R$ . Причем наличие этого источника приводит к необходимости с точки зрения точности расчета сопротивления покрытия повышать напряжение внешнего источника. Этому препятствовали пробой покрытия, отмеченные при напряжении  $V_1$  более 30 В и ограничивающим сопротивлением 270 Ом.

Определяемые расчетные значения  $\langle R \rangle$  и  $\langle V \rangle$  могут в свою очередь зависеть от величины измерительного тока. Поэтому более корректно использовать режим стабилизации измерительного тока. Значения  $\langle R \rangle$  и  $\langle V \rangle$  зависят от расстояния  $l$  и могут отличаться при наличии и отсутствии подаваемых реагентов в плазму, что следует учитывать при расчетах.

#### Анализ результатов измерений напряжения между анодом плазматрона и деталью

Основным недостатком используемой ранее технологии контроля качества покрытия является резкое уменьшение точности измерения тока с увеличением толщины покрытия. Кроме того, затруднен контроль готовности измерительной системы к работе, так как токовый сигнал в отсутствии контакта плазмы с деталью отсутствует.

Оценки величины сопротивления покрытия [4] дают значения  $r_d$  порядка десятков килоом для типичных значений  $d$  порядка 1 мкм. Отсюда следует, что значение  $R_1$  должно составлять 100 кОм и более, при этом напряжение  $V_1$  должно быть достаточно большим, чтобы не учитывать вклад  $\langle V \rangle$  при расчетах. В экспериментах указанные параметры повышались до значений, обеспечивающих корректность измерений с точки зрения метрологии.

Опишем результаты экспериментов, проведенных на установке, обеспечивающей вращение цилиндрических деталей и линейное перемещение плазматрона. Расстояние  $l$  от среза сопла плазматрона до детали составляло  $l = 10$  мм и соответствовало оптимальному для процесса осаждения покрытия. На рис. 4, а приведена типичная временная зависимость напряжения между анодом плазматрона и деталью (в этих опытах анод был заземлен).

Покрытие наносили начиная с первой секунды на цилиндрическую поверхность вращающейся с частотой  $2 \text{ с}^{-1}$  заготовки диаметром 50 мм, изготовленной из стали У10. При этом перемещения плазматрона относительно детали не проводилось. Значения  $U$  регистрировались АЦП с дискретностью 1 с. Полученная зависимость начиная с 15-й секунды имела практически линейный характер. Можно считать, что в начальный момент времени абсолютная величина сигнала составляет около 3 В. Сигнал отрицательный и примерно соответствует  $\langle V \rangle$ . Отклонения от линейной зависимости в первые секунды могут быть связаны с особенностями формирования покрытия на начальном этапе (островная структура). Приблизительно на 150-й секунде сигнал  $U$  увеличивается до нуля.

Из закона Ома нетрудно оценить суммарное сопротивление

$$\langle R \rangle + r_d = (R_1 \langle V \rangle) / V_1 = 6 \text{ кОм.}$$

Таким образом, величина  $\langle R \rangle$  не влияет на линейность, а изменения сигнала пропорциональны сопротивлению покрытия. Сказанное справедливо, если толщина пленки нарастает линейно со временем и ее структура и состав остаются постоянными. После 500 с процесс нанесения был остановлен, при этом сигнал  $U$  составлял около 8 В, что соответствовало значению  $r_d$ , примерно равному 20 кОм. Отсюда следует, что дополнительный источник совместно с добавочным резистором работали как источник постоянного тока. Оценить толщину покрытия можно, используя расчетное значение средней проводимости [4] и величину так называемой площади переноса тока, которая принимается равной площади пленки, полученной при нанесении покрытия без перемещения плазматрона относительно детали (примерно  $20 \text{ мм}^2$ ). Расчет показывает, что толщина нанесенного покрытия  $d$  в конце процесса составляла примерно 0,7 мкм.

Таким же методом, используя плазму в качестве контактного датчика в условиях подачи реагентов, можно оценивать толщину уже нанесенных покрытий и качество подготовленной к обработке поверхности. На рис. 4, б приведена типичная зависимость сигнала, полученная при поступательном перемещении плазматрона относительно вращающейся цилиндрической детали длиной 200 мм и диаметром 60 мм, изготовленной из стали У10, с заранее нанесенным в виде широкого (около 20 мм) кольца покрытием. Необходимость вращения вызывалась сильным нагревом, отмеченным при относительно медленном линейном перемещении, около 1 см/мин. Движение начиналось на чистом металле и заканчивалось на середине кольцево-

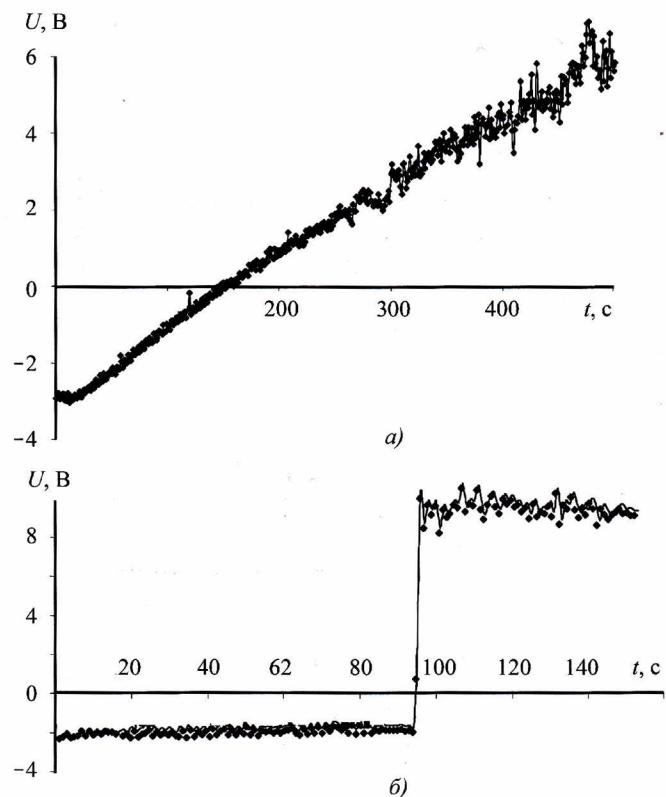


Рис. 4. Зависимости напряжения между анодом плазматрона и деталью от времени:  
а – режим нанесения покрытия; б – режим контроля

го покрытия. Значения  $U$  регистрировались АЦП с той же дискретностью. Величина сигнала при движении по чистому металлу составляла  $-2 \text{ В}$ , а начиная с 95-й секунды резко увеличивалась до  $+10 \text{ В}$ . С учетом того что свечение плазменной струи в режиме без подачи реагентов, формирующих покрытие, имело явные отличия от свечения в рабочем режиме значение  $\langle V \rangle$  не соответствовало ранее полученному значению  $-3 \text{ В}$ . Резкий скачок значений  $U$  при переходе границы покрытия может быть объяснен достаточно высокой проводимостью плазменной струи. Вопросы контроля качества покрытия, а именно характеристики сплошности и однородности в принципе удобно решать обработкой электрического сигнала, формируемого датчиком, не имеющим механического контакта с поверхностью. При этом возникает задача оптимизации целого ряда параметров при контроле в процессе нанесения покрытия или контроле уже нанесенного покрытия.

## Выводы

1. Разработан универсальный метод, который после соответствующей калибровки может быть использован для неразрушающего контроля толщины и качества покрытий путем измерения их сопро-

тивления с применением источника постоянного тока. При этом регистрируемый электрический сигнал пропорционален толщине покрытия.

2. Предложена эквивалентная электрическая схема измерительной цепи, позволившая объяснить приведенные в работах [5, 6] результаты измерения тока в процессе нанесения покрытия при ФПУ. Схема учитывает электрические свойства плазмы за счет использования двух элементов – источника ЭДС постоянного тока  $V$  и сопротивления плазмы  $R$ .

3. В целях контроля постоянства состава покрытия предложено использование более сложной измерительной схемы с дополнительным источником переменного тока, обеспечивающей определение обоих компонентов комплексного сопротивления участка цепи, включающего покрытие.

### Библиографический список

1. **Baghdachi J., Provder T., Smart A.** Design and Development of Self-Healing Polymers and Coatings // Coatings III. Series: ACS Symposium. American Chemical Society. 2010. V. 1050. P. 3 – 20.
2. **Mosleh M., Pryds N., Vang Hendriksen P.** Thickness Dependence of the Conductivity of thin Films (La,Sr)FeO<sub>3</sub> Deposited on MgO Single Crystal // Materials Science and Engineering, 2007. V. 144. P. 38 – 42.
3. **Jiangy H., Wang C., Zhang W. et al.** Influences of Film Thickness on the Electrical Properties of TaNx Thin Films Deposited by Reactive DC Magnetron Sputtering // J. Mater. Sci. Technol. 2010. V. 26. N 7. P. 597 – 600.
4. **Калмыков А. В., Тополянский П. А.** Исследование электрических характеристик тонких кремнийуглеродсодержащих покрытий // Дефектоскопия. 2003. № 10. С. 38 – 44.
5. **Тополянский П. А., Ермаков С. А., Соснин Н. А.** Исследование электрических параметров плазменной струи на участке анод плазмотрона – изделие при финишном плазменном нанесении тонкопленочного покрытия // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 6-й Междунар. практик. конф. 13 – 16 апреля 2004 г., Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. С. 289 – 298.
6. **Ермаков С. А., Соснин Н. А., Тополянский П. А., Калмыков А. В.** Повышение качества тонкопленочного покрытия в процессе финишного плазменного упрочнения за счет использования сопутствующего контроля // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 9-й практик. конф. 10 – 13 апреля 2007 г., Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. Ч. 2. С. 96 – 100.

### References

1. Baghdachi J., Provder T., Smart A. (2010). *Design and development of self-healing polymers and coatings. Coatings III. Series: ACS Symposium*. American Chemical Society. V. 1050, pp. 3-20.
2. Mosleh M., Pryds N., Vang Hendriksen P. (2007). Thickness dependence of the conductivity of thin films (La,Sr)FeO<sub>3</sub> deposited on MgO single crystal. *Materials Science and Engineering*, 144, pp. 38-42. doi: 10.1016/j.mseb.2007.07.089
3. Jiangy H., Wang C., Zhang W. et al. (2010). Influences of film thickness on the electrical properties of TaNx thin films deposited by reactive DC magnetron sputtering. *J. Mater. Sci. Technol.*, 26(7), pp. 597-600. doi: 10.1016/S1005-0302(10)60091-6
4. Kalmykov A. V., Topolianskii P. A. (2003). The study of electrical characteristics of thin silicon carbon-containing coatings. *Defektoskopija*, (10), pp. 38-44.
5. Topolianskii P. A., Ermakov S. A., Sosnin N. A. (2004). *The study of electrical parameters of a plasma jet on the section of the anode of the plasma torch – product while finishing plasma deposition of thin film coatings*. The technology of repair, restoration, strengthening and renewal of machinery, equipment and steel structures. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International practical conference. 13 – 16 April 2004, St. Petersburg. St. Petersburg: Izdatel'stvo SPbGPU, pp. 289-298.
6. Ermakov S. A., Sosnin N. A., Topolianskii P. A., Kalmykov A. V. (2007). *Improving the quality of thin-film coatings in the process of finishing plasma hardening by means of appropriate control to the process*. The technology of repair, restoration and strengthening of machine parts, machinery, equipment, tools and technological equipment. Proceedings of the 9<sup>th</sup> practical conference. 10 – 13 April 2007, St. Petersburg. St. Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, part 2, pp. 96-100.