

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Одеський національний політехнічний університет

*Праці*

*ОДЕСЬКОГО ПОЛІТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ*

Науковий та науково-виробничий

збірник

Виходить двічі на рік

Заснований у лютому 1996 року

Вип. 1(35). 2011

Одеса

2011

Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. — Одеса, 2011. — Вип. 1(35). — 322 с. — Мова. укр., рос., англ.

## РЕДАКЦІЙНА РАДА

*Г.О. Оборський* (Одеса) — головний редактор, *С.А. Адронаті* (Одеса),  
*В.П. Астахов* (США, Мічиган), *Б.І. Басок* (Київ), *Маргарет Бейлі* (США, Нью-Йорк),  
*Є.В. Бодянський* (Харків), *Р.А. Бунь* (Львів), *С.М. Васильєв* (Росія, Москва),  
*А.С. Верещака* (Росія, Москва), *В.О. Власенко* (Польща, Ополе),  
*О.С. Гаркавенко* (Німеччина, Корнвестхайм), *В.Д. Гогунський* (Одеса),  
*В.Т. Гринченко* (Київ), *О.Ф. Дащенко* (Одеса), *О.В. Єфімов* (Харків), *В.Ф. Зінченко* (Одеса),  
*Карл-Гейнц Векінг* (Німеччина, Штуттгарт), *О.О. Ключников* (Київ),  
*Г.В. Кострова* (Одеса) — заступник головного редактора, *Б.В. Кунішенко* (Одеса),  
*В.М. Кунцевич* (Київ), *А.О. Лебедев* (Київ), *С.В. Ленков* (Київ), *Л.Л. Литвинський* (Київ),  
*Л.М. Любчик* (Харків), *А.Л. Майстренко* (Київ),  
*М.В. Максимов* (Одеса) — заступник головного редактора, *Й.С. Мисак* (Львів),  
*В.А. Мокрицький* (Одеса), *І.М. Неклюдов* (Харків), *В.Р. Нікульшин* (Одеса),  
*Л.О. Плескач* (Одеса) — відповідальний секретар, *П.А. Покритан* (Росія, Москва),  
*Б.С. Прістер* (Київ), *В.І. Слисенко* (Київ), *В.О. Стрижало* (Київ), *А.В. Усов* (Одеса),  
*Н.М. Фіалко* (Київ), *С.В. Філіппова* (Одеса), *С.Є. Щеклеїн* (Росія, Єкатеринбург),  
*М.О. Ястребенецький* (Харків)

Рекомендується до друку вченою радою  
Одеського національного політехнічного університету,  
протокол № 8 від 26.04.2011 р.

Комп'ютерна версія опублікованих матеріалів за адресою:  
<http://www.opu.ua>

## ЗМІСТ

### МАШИНОБУДУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЯ МЕТАЛІВ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

<i>В.Ф. Оробей, Г.В. Кострова. Устойчивость балок с распределенными параметрами .....</i>	15
<i>В.М. Тонконогий, И.В. Прокопович, А.А. Березовский. Структурное моделирование процесса формирования покрытий на деталях машин с помощью полумарковских моделей .....</i>	24
<i>А.А. Коряченко, А.Л. Становский, И.Н. Щедров. Идентификация скрытых организационных нарушений технологии литейного производства .....</i>	28
<i>А.Г. Баханович, И.И. Сидоренко, Э.Д. Кравцов. Сравнительный анализ усталостной прочности зубьев приводных зубчатых ремней .....</i>	32
<i>Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, С.Н. Макаров. Анализ способов определения припуска на механическую обработку .....</i>	36
<i>С.С. Гутиря, Д.М. Борденюк, А.М. Чанчин. Технічна еволюція світового і вітчизняного тролейбусобудування .....</i>	42

### ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНІКА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

<i>Р.Л. Гонтарь, О.В. Маслов, В.О. Давыдов. Влияние угла облучения коллиматора детектора на качество восстановления интенсивности гамма-излучения твэлов ТВС .....</i>	49
<i>В.П. Кравченко, М.П. Галацан. Можливість підвищення потужності турбіни К-1000-60/3000 при роботі взимку .....</i>	54
<i>В.И. Ковальчук, О.А. Дорож, В.В. Чиченин. Факторные функции рабочей обменной емкости катионитов .....</i>	58
<i>П.О. Котов, А.Є. Денисова. Інтегрована теплонасосна система теплопостачання з двигуном Стирлінга, що працює на біопаливі .....</i>	63
<i>В.В. Высочин. Метод расчета гелиосистемы с абсорбционным тепловым насосом .....</i>	66
<i>О.С. Ларионова. Моделювання динамічних характеристик контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки .....</i>	71
<i>В.А. Арсирій, В.П. Ярошевский. Неравнозначность влияния сопротивлений на параметры аэродинамической системы в зонах избыточного давления и разрежения .....</i>	74
<i>А.С. Бондарчук, Д.П. Низова. Зіставлення теоретичного і реального розрахункового питомого електричного навантаження жител в умовах міста Одеси .....</i>	78

### КОМП'ЮТЕРНІ Й ІНФОРМАЦІЙНІ МЕРЕЖІ І СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА

<i>Д.А. Маевский, С.А. Яремчук. Сравнительный анализ моделей надежности программного обеспечения на этапе эксплуатации .....</i>	82
--	----

УДК 621.767.001.57

В.М. Тонконогий, д-р техн. наук, проф.,  
И.В. Прокопович, канд. техн. наук, доц.,  
А.А. Березовский, специалист,  
Одесс. нац. политехн. ун-т

## СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ ПОЛУМАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ

*В.М. Тонконогий, И.В. Прокопович, А.А. Березовский. Структурне моделювання процесу формування покриття на деталях машин за допомогою напівмарковських моделей. Показано, що сучасне автоматизоване проектування технології нанесення покриттів неможливе без адекватної структурної моделі процесу. Запропоновано напівмарківська модель нанесення, заснована на гіпотезі про ймовірнісний характер заповнення простору біля поверхні підкладки, яка поєднує параметри процесу формування покриття з його властивостями.*

*В.М. Тонконогий, И.В. Прокопович, А.А. Березовский. Структурное моделирование процесса формирования покрытий на деталях машин с помощью полумарковских моделей. Показано, что современное автоматизированное проектирование технологии нанесения покрытий невозможно без адекватной структурной модели процесса. Предложена полумарковская модель нанесения, основанная на гипотезе о вероятностном характере заполнения пространства у поверхности подложки и связывающая параметры процесса формирования покрытия с его свойствами.*

*V.M. Tonkonogy, I.V. Prokopovich, A.A. Berezovsky. The machine details coatings formation process structure simulation using semimarkov models. It is shown that the modern automated designing of coverings drawing technology is impossible without adequate structural model of process. The semimarkov model of drawing based on a hypothesis about likelihood character of space at a surface of a substrate filling and connecting parameters of a covering formation process with its properties is offered.*

Одним из прогрессивных способов финишной обработки деталей машин являются металлические покрытия. Качество этих покрытий зависит от многих факторов, но главным из них является дефектность в виде инородных включений. Последняя сказывается практически на всех эксплуатационных свойствах и, прежде всего, надежности деталей, т.к. свойства материала, из которого состоят включения, как правило, существенно отличаются от свойств материала самого покрытия.

Наиболее ярким примером такого различия являются капельные включения металлического титана в покрытиях из нитрида титана, получаемом методом конденсации в вакууме на поверхности изделия вещества из плазменной фазы с ионной бомбардировкой — методом КИБ. В этом случае небольшая капля весьма прочного и жесткого титана практически оказывается порой в сверхтвердом нитриде. Таким образом, капельная фаза в теле покрытия с точки зрения влияния на механические свойства представляет собой ту же пористость, от которой зависят почти все физико-механические свойства покрытий [1].

Причиной образования таких включений является неудачный выбор параметров технологии, приводящих к эрозии катода в вакуумной дуге, что приводит, в итоге, к образованию макрочастиц — капель и твердых осколков металла кагда в теле покрытия.

Изучение включений с помощью оптического микроскопа при больших увеличениях показывает, что частицы включений имеют округлую форму. Отклонения формы большинства частиц от сферы свидетельствует о том, что в момент удара о поверхность нанесения они находились в жидком состоянии. Частицы имеют случайные размеры 0,1...1 мкм (при толщине покрытия порядка 6 мкм), однако встречаются и более крупные. Количество макрочастиц зависит от материала катода, тока дугового разряда, теплового режима и формы катода. Распределение

количества частиц по размерам неравномерно — оно экспоненциально возрастает с уменьшением их диаметра. Однако основные потери массы в капельной фазе происходят за счет частиц размером 0,2...0,5 мкм. Частицы имеют положительный заряд, обусловленный эмиссией электронов с их раскаленной поверхности [2].

Кроме жидких капель в продуктах эрозии катода дуги иногда обнаруживаются твердые осколки катодного материала. Причиной их образования являются возникающие в катоде термоупругие напряжения, превышающие предел прочности материала катода.

По современным представлениям испускание жидких капель пятном дуги происходит при формировании на поверхности катода эрозионных кратеров [3, 4]. Поэтому проектирование технологии КИБ включает разработку таких режимов нанесения, которые исключают образование включений. Такое проектирование, в свою очередь, нуждается в адекватной модели процесса нанесения, связывающей параметры технологии со свойствами готового изделия.

Целью работы является повышение эксплуатационной надежности вакуумных плазменных покрытий на этапе проектирования технологии их нанесения путем построения адекватной вероятностной структурной модели формирования покрытий, основанной на теории полумарковских цепей.

Представим себе пространство, примыкающее к поверхности подложки, которое в процессе нанесения заполняется материалом покрытия и включениями. Заполнение происходит дискретно: один элемент материала покрытия — одна ячейка дискретизации объема последнего. Будем считать потоком событий последовательное совмещение элементов с ячейками. С учетом соотношения размеров покрытий и включений, а также их конфигурации (рис. 1), построим схему заполнения, представляющую собой двухмерное сечение объема покрытия плоскостью, перпендикулярной поверхности и конечное множество элементов, движущихся к покрываемой поверхности со своими (в общем случае, случайными) скоростями и образующими таким образом очередь на заполнение вакантных ячеек.



×2000

а



×500

б

Рис. 1. Фрагмент покрытия (а) и дефект в виде капельной фазы (б)

Разобьем условно сечение на  $L \times S$  квадратных конечных элементов — позиций заполнения. Во времени модель процесса нанесения разобьем на отдельные фазы одинаковой продолжительности, в течение которых пространство  $L \times S$  заполняется материалом покрытия либо материалом включения.

Будем считать каждое событие заполнения элемента переходом системы из состояния в состояние, происходящим в случайные моменты времени, которые заранее указать невозможно. При этом весь процесс инициируется потоком событий: появлением очередных элементов покрытия и элементов включений (рис. 2). Для описания таких процессов применена схема марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем — полумарковская цепь.

Примем следующие допущения.

1. Поток событий является стационарным, т.к. вероятность попадания того или другого числа событий на участок времени длиной  $\tau$  зависит только от длины участка и не зависит от того, где именно на оси  $0t$  расположен этот участок (однородность по времени) — вероятностные характеристики такого потока не меняются от времени.

2. Поток событий является потоком без последствия, т.к. для любых непересекающихся участков времени число событий, которые попадают на один из них, не зависит от того, сколько событий попало на другой. Таким образом, события, которые образуют поток, появляются в последовательные моменты времени независимо одно от другого.

3. Поток событий является ординарным, т.е. вероятность попадания на элементарный участок двух или более событий пренебрежительно мала в сравнении с вероятностью попадания одного события.

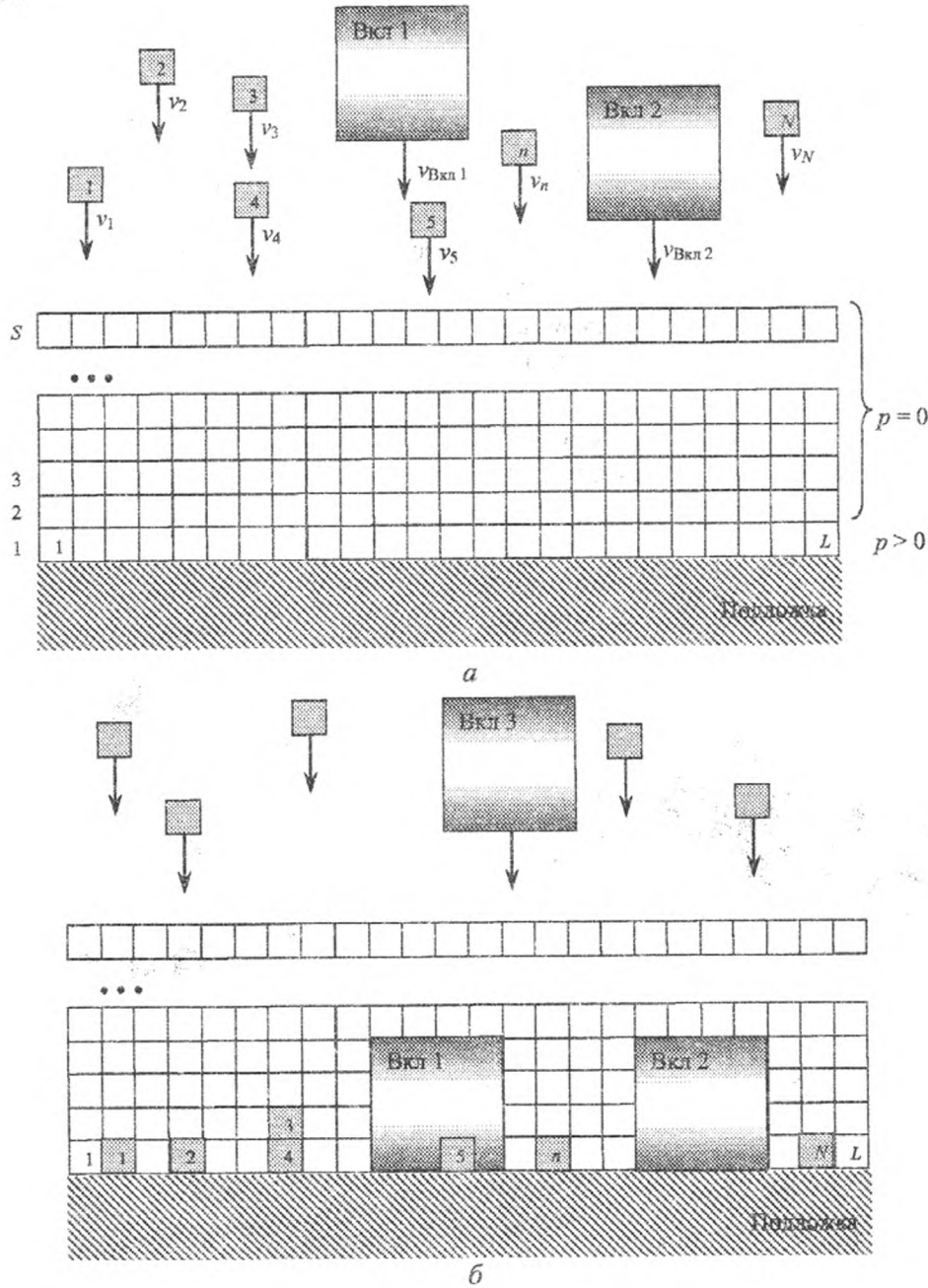


Рис. 2. Схема полумарковской модели нанесения покрытия из дисперсного потока при наличии посторонних включений: а — начало процесса; б — конец первой фазы

Пусть  $S = \{S_0, S_1, \dots, S_n\}$ . Обозначим через  $p_i(t)$  — вероятность того, что в момент  $t$  система  $S$  будет находиться в состоянии  $S_i$  ( $i = 1, n$ ).

Очевидно  $\sum_{i=1}^n p_i(1) = 1$ . Поставим задачу — определить для любого времени  $t$  вероятность  $p_i(t)$ . Вместо переходных вероятностей  $p_{ij}$  введем понятия плотностей вероятностей перехода  $\lambda_{ij}$

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}, \quad (1)$$

$$p_{ij}(\Delta t) \approx \lambda_{ij} \Delta t. \quad (2)$$

Если известны  $\lambda_{ij}$  для всех пар состояний, можно определить  $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$  как функции времени [5]. Эти вероятности удовлетворяют дифференциальным уравнениям Колмогорова. Интегрирование которых при известном начальном состоянии системы даст искомые вероятности состояний как функции времени. В левой части каждого уравнения находится производная вероятности состояния, а правая часть содержит столько членов, сколько стрелок связано с данным состоянием на графе возможных переходов. Каждый член равняется произведению плотности вероятности перехода, соответствующей данной стрелке, умноженной на вероятность того состояния, из которого выходит стрелка.

Эти вероятности непосредственно связаны с технологическими параметрами технологии, например, случайное время достижения частицей поверхности определяется разностью потенциалов между катодом и деталью, а количество и размер включений — с величиной катодного тока.

Кроме того, на переходы накладываются существенные ограничения вида: вероятность запыления  $i$ -м элементом  $j$ -й ячейки равна нулю, если соседняя ячейка, расположенная ниже (по рисунку) свободна.

В практике конденсации в вакууме на поверхности изделия вещества из плазменной фазы с ионной бомбардировкой необходимые параметры процесса, обеспечивающие допустимые концентрации включений, подбираются экспериментально. Для этого затрачиваются большое количество материалов, энергии и времени. Разработанная модель позволяет избежать этого. Она дает возможность быстро и удобно рассчитывать необходимые параметры для каждого конкретного случая. При этом точность прогноза достаточно высока, что подтверждено опытами с покрытиями из нитрида титана. Сравнение расчетных и экспериментальных значений дало отклонение в 10...12 %.

## Литература

1. Петров, С.В. Плазменное газоздушное напыление / С.В. Петров, И.Н. Карп. — К.: Наук. думка, 1993. — 494 с.
2. Тонконогий, В.М. Автоматизация технологического процессу нанесения ионно-плазмових зносостійких покриттів на ріжучий інструмент: авторсф. дис.... д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 "Автоматизация технологических процессов" / В.М. Тонконогий. — Одеса: ОНПУ, 2004. — 32 с.
3. Тонконогий, В.М. Система автоматизованого управління технологією нанесення зносостійких іонно-плазмових покриттів // Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. — 2004. — Вип. 1(28). — С. 141 — 145.
4. Тонконогий, В.М. Моделирование прочности сцепления износостойких покрытий с подложкой с помощью виртуальных конечных элементов // Резание и инструмент в технол. системах. — Харьков: ХПИ, 2004. — Вып. 66. — С. 191 — 196.
5. Ежов, И.И. Полумарковские процессы и их приложения / И.И. Ежов, В.С. Королюк // Кибернетика. — 1967. — № 5. — С. 58 — 65.

Поступила в редакцию 30 октября 2010 г.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Становский А.Л.

Міністерство освіти і науки,  
молоді та спорту України

Одеський національний політехнічний  
університет

**Праці  
ОДЕСЬКОГО ПОЛІТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ**

(українською, російською та англійською мовами)

Виходить двічі на рік

Науковий та науково-виробничий збірник

**Вип. 1(35). 2011**

Зареєстрований в Міністерстві юстиції України  
10.02.2010 р. № 16245-4717 ПР

Внесений до переліку наукових фахових видань  
України, в яких можуть публікуватися результати  
дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів  
доктора і кандидата наук з технічних і економічних  
галузей науки, постановою президії ВАК України  
від 1 липня 2010 р. № 1-05/5.

Редактори

Кострова Г.В.

Мозель Л.М.

Плескач Л.А.

Комп'ютерне верстання

Прокопович І.В.

Ministry of Education, Science,  
Youth and Sports of Ukraine

Odesa National Polytechnic University

**ODES'KYI POLITECHNICHNYI  
UNIVERSYTET.  
Pratsi**

(Language: UKR-RUS-ENG)

Published twice a year

Scientific, science and technology collected articles

**Iss. 1(35). 2011**

Registered in the Ministry of Justice of Ukraine  
on February 10, 2010, № 16245-4717 ПР

Included in the list of scientific professional titles of  
Ukraine where the results of Ph. D. and Sci. D. dissertations  
in the field of technical and economic sciences  
can be published, by the regulation of the Ukrainian Supreme  
Certifying Commission presidium  
№ 1-05/5 from July 1, 2010.

Editors

Kostrova G.V.

Mozel L.M.

Pleskach L.A.

Layout

Prokopovich I.V.

**Адреса редакції:**

Україна,

Одеський національний політехнічний університет,  
пр-т Шевченка, 1,  
Одеса, 65044.

Тел./факс (0482) 37-79-72;

Тел. +38(048)734-8327; +38(048)734-8530.

Електронна адреса: kostrova@opu.ua;

prof.maksimov@gmail.com

**Editorial board address:**

Odesa,

National Polytechnic University,  
Shevchenko av., 1,  
Odesa. 65044, Ukraine.

Tel./fax: +38(0482)34-42-73;

tel.: +38(048)734-8327; +38(048)734-8530.

E-mail: kostrova@opu.ua;

prof.maksimov@gmail.com

---

Здано у виробництво 25.04.2011. Підписано до друку 11.05.2011. Формат 60×88/8. Папір офсетн.  
Гарнітура "Times New Roman". Друк офсетний. Ум. др. арк. 40,25. Тираж 300 прим. Зам. № 671

---

Видавництво і друкарня "ТЕС",  
вул. Канатна, 81/2, Одеса, Україна, 65044.

Тел. +38(0482)42-90-98

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ви-  
готовлювача видавничої продукції

ДК № 771, від 15.01.2002 р.

Publishing and printing houses "TEC",  
Kanatna str., 81/2, Odesa, 65044, Ukraine.

Tel. +38(0482)429098

Producer public registration certificate  
from 15.01.2002, ДК № 771

**Надруковано з готових оригінал-макетів  
Одеського національного політехнічного університету.**

**Printed using the layouts prepared at the Odesa National Polytechnic University**