

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.

*В.М. 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 покрытий.

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 катода 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.



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.

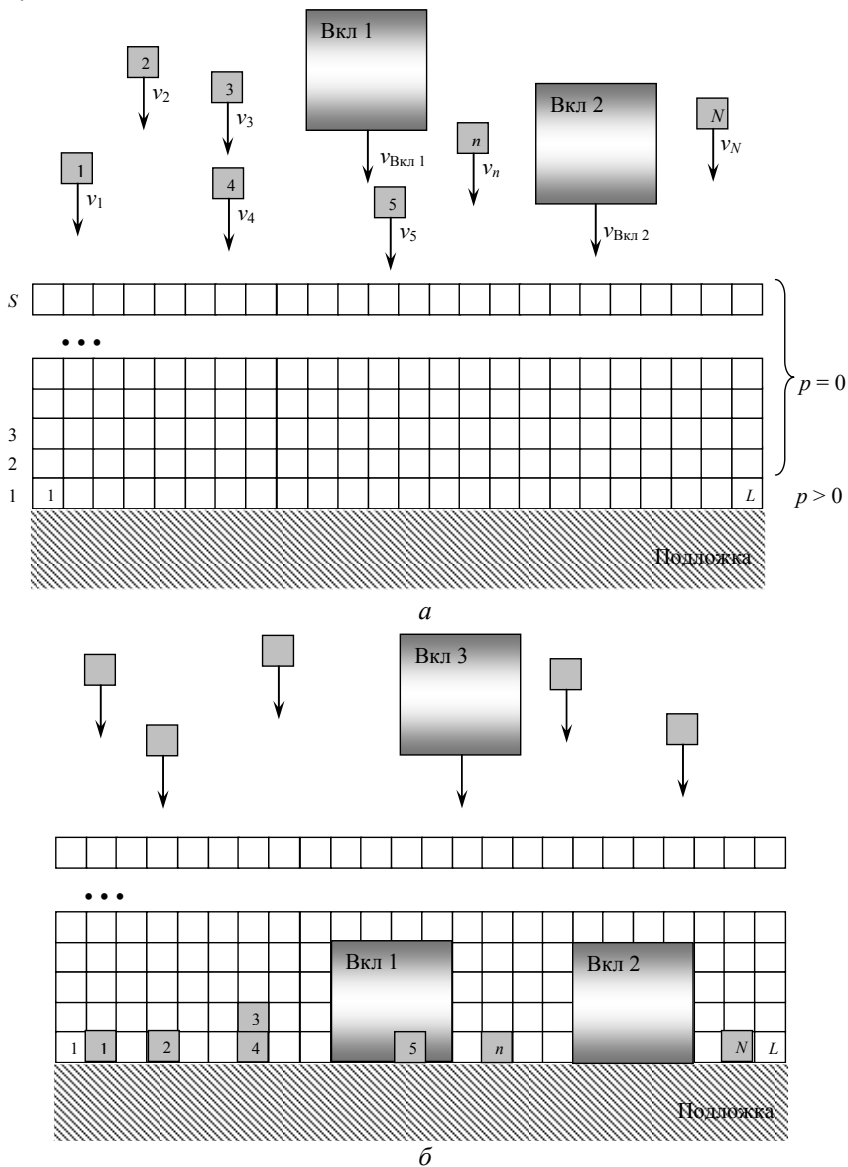


Рис. 2. Схема полумарковской модели нанесения покрытия из дисперсного потока при наличии посторонних включений: а — начало процесса; б — конец первой фазы

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  $S_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ).

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 заполнения  $i$ -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. Автоматизація технологічного процесу нанесення іонно-плазмових зносостійких покриттів на ріжучий інструмент: автореф. дис... д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 “Автоматизація технологічних процесів” / 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. Корольюк // 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.