

УДК 621.793.18

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

С. С. Дружков

drugkov.s.s@rambler.ru

Рыбинский государственный авиационный технический университет
им. П. А. Соловьева (РГАТУ)

Поступила в редакцию 22.05.2013

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований по получению математической модели скорости процесса магнетронного распыления, на основе которых предлагается способ повышения интенсивности процесса за счет оптимизации давления газа в вакуумной камере по скорости распыления.

Ключевые слова: магнетронное распыление; производительность; оптимизация; рабочее давление; параметрические зависимости.

В настоящее время эффективным направлением повышения характеристик металлорежущего инструмента является нанесение на его рабочую часть упрочняющих наноструктурированных покрытий, обладающих высокой твердостью, вязкостью, теплостойкостью, низким коэффициентом трения [1]. Эти свойства покрытий обусловлены такими факторами, как малый размер кристаллитов, большая объемная доля границ раздела, образование многофазных кристаллических состояний и межзеренных аморфных прослоек. Механизм повышения рабочих характеристик заключается в том, что ультрадисперсные материалы с увеличенной площадью межзеренных границ имеют сбалансированное соотношение твердости, оказывающей положительное влияние на износостойкость, и прочностными характеристиками материала. Таким образом, упрочняющие наноструктурированные покрытия, благодаря комплексу обладаемых ими свойств, имеют большое значение в современной инструментальной промышленности.

Наиболее перспективным методом нанесения данных покрытий является магнетронное распыление, обеспечивающее формирование совершенной нанокompозитной структуры покрытия с высокой гладкостью поверхности, обладающей низким коэффициентом трения и гарантирующей высокоэффективную защиту от износа и коррозии при повышенных температурах [2]. Несмотря на это данный метод нанесения покрытий не получает промышленного распространения ввиду низкой скорости напыления. Поэтому актуальной научно-технической

задачей является поиск способов повышения производительности процесса магнетронного напыления, что позволит обеспечить распространение данного метода и выпуск конкурентоспособного отечественного металлорежущего инструмента.

В результате проведенных исследований было установлено, что одним из основополагающих факторов формирования качества синтезируемых покрытий является качество плазмы, создаваемой в вакуумной камере. Качество плазмы в свою очередь определяется выполнением множества требований и условий осуществления процессов ионно-плазменного распыления. Показателем, представляющим количественное выражение действующего комплекса качественных условий процесса, является рабочее давление. Давление газа в вакуумной камере в процессе нанесения покрытия находится в динамической взаимосвязи с технологическими параметрами процесса, такими как разрядные токи и напряжения, ток и напряжение смещения, концентрация реактивного газа, скорость прокачки, расходы газов. Следовательно, рабочее давление газа в вакуумной камере играет существенную роль в процессе магнетронного нанесения покрытий: через данный параметр происходит опосредование взаимосвязи комплекса качественных характеристик, а также множества количественных параметров процесса напыления с качеством синтезируемых покрытий.

В данной работе предлагается способ повышения производительности процесса магнетронного распыления за счет оптимизации дав-

ления газа в вакуумной камере по скорости распыления, который базируется на возможности компенсации случайных изменений технологических параметров процесса и влияния внешних возмущений (факторов, определяющих качество плазмы) путем регуляции давления газа в вакуумной камере.

Сущность предлагаемого способа заключается в том, что значения основных параметров, определяющих ход процесса напыления (разрядные токи и напряжения, ток и напряжение смещения, давление газа в вакуумной камере, расходы газов, частота импульсов), контролируются системой управления в соответствии с базовыми алгоритмами управления вакуумной установки. В то же время на основании регистрируемых значений параметров осуществляется дополнительный расчет оптимальной величины давления газа по скорости распыления материала мишени. Рассчитанное значение давления сообщается системе управления и задается в ней в качестве текущего. Указанные действия происходят непрерывно за счет функционирования программного обеспечения.

В результате появляется возможность сокращения затрат времени на процесс нанесения покрытия за счет поддержания его на повышенной (относительно базового варианта) скорости, характеристики получаемых покрытий при этом останутся на прежнем уровне.

В данной статье рассматривается этап выбора симплекса оптимизации давления и формирование определяющей его целевой функции.

Поскольку производительность любого процесса определяется как количество получаемого продукта в единицу времени, в качестве симплекса оптимизации рационально использовать численный комплекс, представляющий отношение количества распыленного материала к единице времени. Оптимизируемым параметром в данном случае является давление газа, следовательно, целевая функция должна представлять математическую модель непосредственной зависимости скорости распыления от давления газа в вакуумной камере. Для решения задачи повышения скорости процесса необходимо разработать математическую модель, которая позволит не только повысить скорость распыления, но и управлять самим процессом распыления.

В результате анализа литературных данных [3–7, 9] было установлено, что за основу формируемой модели целесообразно принять формулу [4]:

$$v_p = \frac{6,25 \cdot 10^{24} \cdot j_u \cdot Y \cdot m_a}{Na \cdot \rho}, \quad (1)$$

где v_p – скорость распыления, м/с; j_u – плотность ионного тока, А/м²; Y – коэффициент распыления, атом/ион; m_a – масса выбиваемого атома, кг/моль; Na – число Авогадро, атом/моль; $Na=6 \cdot 10^{23}$ атом/моль; ρ – плотность материала, кг/м³.

Согласно формуле (1), параметрами, с помощью которых можно изменять скорость распыления в отдельном процессе, являются коэффициент распыления и плотность ионного тока. В связи с этим решение задачи по установлению взаимосвязи скорости распыления с давлением газа перешло к определению зависимостей параметров плотности ионного тока и коэффициента распыления от давления газа в камере.

При выводе математической модели коэффициента распыления за основу была принята зависимость, устанавливающая его взаимосвязь с энергией ионов при низких значениях (до $0,16 \cdot 10^{-15}$ Дж) [5]. Согласно источнику [10] было принято решение не учитывать в модели коэффициента распыления угол падения распыляющих частиц на мишень, что позволило упростить модель, не нарушая при этом ее соответствия процессу магнетронного распыления. Энергия ионов в оригинальной зависимости была заменена в соответствии с формулой [4]

$$E_u = U_d \cdot q_e, \quad (2)$$

где q_e – заряд электрона, Кл; $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; U_d – напряжение разряда, В.

Таким образом, модель коэффициента распыления согласно имеющимся данным получила вид

$$Y = \frac{3\beta m_u m_a}{2\pi^2 (m_u + m_a)} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot U_d}{E_{суб}}, \quad (3)$$

где β – коэффициент, определяемый для конкретной пары «газовая среда – материал мишени» [5]; m_u – масса бомбардирующего иона, кг/моль; $E_{суб}$ – энергия сублимации, Дж.

Рациональным решением для определения непосредственных взаимосвязей напряжения разряда, а также плотности ионного тока с параметром давления газа являлось построение регрессионных зависимостей между исследуемыми факторами на основании экспериментов, выполняемых на установке для напыления, и использование полученных уравнений регрессии в качестве необходимых математических моделей. Данные исследования выполнялись на

установке ионно-плазменного магнетронного напыления модели *UniCoat 400* при реализации процесса распыления мишени из титана ВТ1-0 в среде аргона.

Исходными данными для проведения эксперимента по определению зависимости напряжения разряда от давления газа являлись:

- материал распыляемых мишеней ВТ1-0;
- максимальные разрядные напряжения магнетронов $U_{d \max} = 650$ В;
- разрядные токи магнетронов $I_d = 5$ А.

Варьируемый фактор – давление газа, исследуемый – напряжение разряда.

Величина давления задавалась в диапазоне от 0,1 Па до 0,4 Па с шагом 0,02 Па. На каждом этапе эксперимента фактические значения давления и соответствующие им значения разрядного напряжения фиксировались троекратно.

Экспериментальные данные подверглись дальнейшей статистической обработке согласно [8], включающей расчет доверительных интервалов при аппроксимации зависимости с помощью редактора Microsoft Excel. Результаты обработки представлены на рис. 1.

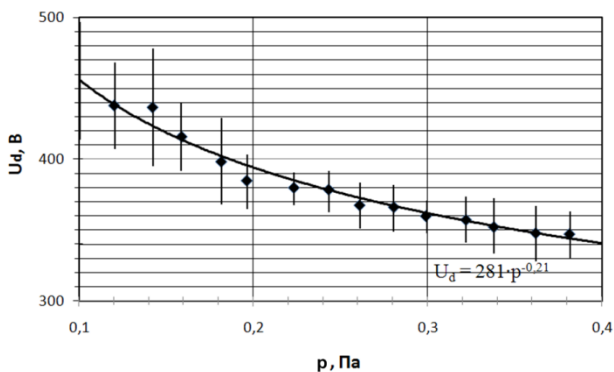


Рис. 1. Эмпирическая зависимость напряжения разряда от давления (установка *UniCoat 400*; материал ВТ1-0; рабочий газ – аргон; максимальное напряжение разряда $U_{d \max} = 650$ В; разрядный ток $I_d = 5$ А)

Таким образом, согласно данным эксперимента было получено уравнение регрессии, отражающее зависимость напряжения разряда от давления газа и имеющее вид

$$U_d = 281 \cdot p^{-0,21}, \quad (4)$$

где p – давление газа, Па.

Проверка адекватности модели по критерию Фишера при уровне доверительной вероятности 5 % согласно [8] подтвердила достаточность таковой. Следовательно, данное уравнение может быть окончательно принято в качестве за-

висимости напряжения разряда от давления газа в камере для установки *UniCoat 400*.

На основании полученной формулы, в соответствии с формулой (2), была образована зависимость энергии ионов от давления, внесение которой в модель коэффициента распыления определило его непосредственную взаимосвязь с величиной давления газа в камере:

$$Y = \frac{3\beta \cdot m_{\text{и}} \cdot m_{\text{а}}}{2\pi^2 \cdot (m_{\text{и}} + m_{\text{а}})^2} \cdot \frac{450 \cdot 10^{-19}}{E_{\text{суб}} \cdot p^{0,21}}, \quad (5)$$

Поскольку основными переменными параметрами, определяющими величину плотности ионного тока, являются значения давления p , разрядного тока I_d и разрядного напряжения U_d , то для получения уравнения плотности тока были проведены исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) магнетронной системы установки *UniCoat 400* при различных значениях давления газа в камере. В процессе распыления мишени из титана ВТ1-0 производились изменения величины разрядного тока на магнетроне в диапазоне 0,5...6 А, с шагом 0,5 А. При этом фиксировались соответствующие значения разрядных напряжений. Измерения производились троекратно с целью последующей статистической обработки. Подобные испытания были выполнены при значениях рабочего давления газа 0,1, 0,2 и 0,3 Па.

Результаты расчетов среднеарифметических значений выходного параметра представлены в табл. 1, графическая интерпретация результатов – на рис. 2.

Для решения задачи по определению зависимости плотности ионного тока от давления газа первоначально была установлена зависимость разрядного напряжения от силы разрядного тока и давления.

Необходимая зависимость была определена на основании экспериментальных данных, полученных при исследовании ВАХ, и зависимости напряжения разряда от давления газа (формула (4)) для установки *UniCoat 400*. Таким образом, вывод указанной формулы был сведен к определению двух частных зависимостей с последующим их объединением.

Для получения зависимости разрядного напряжения от разрядного тока были использованы данные экспериментов на исследование ВАХ. Статистическая обработка проводилась аналогичным предыдущему случаю образом.

С помощью редактора Microsoft Excel были созданы точечные диаграммы зависимостей напряжения от тока при различных давлениях и

выполнена аппроксимация зависимостей с получением уравнений регрессии (рис. 2).

Таблица 1

Результаты расчетов среднеарифметических значений напряжения разряда для опытов эксперимента по исследованию ВАХ

(установка UniCoat 400; материал ВТ1-0; рабочий газ – аргон; максимальное напряжение разряда $U_{d \max} = 650$ В)

№ опыта	I_d , А	Напряжение разряда U_d , В		
		$p=0,1$ Па	$p=0,2$ Па	$p=0,3$ Па
1	0,5	366	327	311
2	1,0	379	345	315
3	1,5	388	347	322
4	2,0	396	350	325
5	2,5	400	354	330
6	3,0	408	355	334
7	3,5	417	365	343
8	4,0	434	376	349
9	4,5	443	383	353
10	5,0	462	388	362
11	5,5	470	395	367
12	6,0	488	403	369

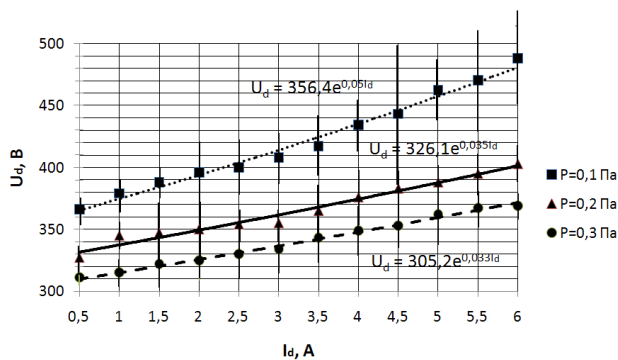


Рис. 2. Эмпирические зависимости напряжения разряда от силы разрядного тока (ВАХ магнетронной системы) (установка UniCoat 400; материал ВТ1-0; рабочий газ – аргон; максимальное напряжение разряда $U_{d \max} = 650$ В)

Полученные зависимости напряжения от силы тока при различных давлениях послужили основой для образования обобщенной зависимости путем расчета среднеарифметических значений коэффициентов, при этом структура уравнения осталась неизменной:

$$U_d = 329e^{0,04 \cdot I_d}, \quad (6)$$

где I_d – сила тока разряда, А.

Из двух полученных частных зависимостей (формулы (4), (6)), путем использования их элементов (численных комплексов, имеющих непосредственное отношение к физическим величинам) и расчета необходимого коэффициента

регрессии, была получена общая модель зависимости напряжения разряда от силы разрядного тока и давления газа:

$$U_d = 229e^{0,04 \cdot I_d} p^{-0,21}. \quad (7)$$

Проверка адекватности модели по критерию Фишера при уровне доверительной вероятности 5 % согласно [8] подтвердила ее достаточность.

Величина силы разрядного тока была выражена из модели (7), которая впоследствии была преобразована в модель для плотности ионного тока с учетом условий эксперимента:

$$j_u = 2083 \ln \left(\frac{U_d \cdot p^{0,21}}{229} \right). \quad (8)$$

На основании формул (1), (5), (6), (8) путем математической обработки была получена математическая модель зависимости скорости распыления от давления газа и силы разрядного тока вида

$$v_p = \frac{8,5 \cdot 10^{11} \cdot \beta \cdot m_u \cdot m_a^2 \cdot \ln(1,44 p^{0,21} e^{0,04 \cdot I_d})}{\pi^2 (m_u + m_a) Na \cdot \rho \cdot E_{\text{суб}} \cdot p^{0,21}}. \quad (9)$$

Графическая интерпретация полученной модели при подстановке конкретных числовых значений с использованием программной среды MathCAD представлена на рис. 3.

Согласно графикам на рис. 3, регуляция давления в большей степени отражается на величине скорости распыления, нежели изменение силы разрядного тока.

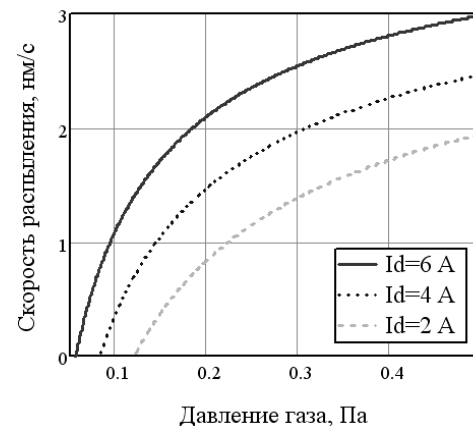


Рис. 3. Графическая интерпретация математической модели скорости распыления при различных значениях разрядного тока ($\beta = 0,4$; $m_u = 6,7 \cdot 10^{26}$ кг/моль; $m_a = 7,95 \cdot 10^{26}$ кг/моль; $Na = 6 \cdot 10^{23}$ атом/моль; $\rho = 4500$ кг/м³; $E_{\text{суб}} = 1,09 \cdot 10^{-18}$ Дж)

Таким образом, графическая интерпретация модели подтверждает целесообразность управления процессом распыления за счет регуляции

давления, а также свидетельствует о пригодности полученной модели как целевой функции при оптимизации давления.

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Предлагается способ повышения производительности процесса магнетронного распыления за счет регулирования давления газа в вакуумной камере с учетом максимизации скорости распыления, который базируется на возможности компенсации случайных изменений технологических параметров процесса и влияния внешних возмущений (факторов, определяющих качество плазмы) путем регуляции давления газа в вакуумной камере.

2. Исследование вольтамперных характеристик установки магнетронного напыления UniCoat 400 при различных значениях рабочего давления установили, что с уменьшением давления кривые ВАХ сдвигаются в область больших рабочих напряжений. Это доказывает косвенное влияние давления на скорость распыления через параметр напряжения разряда.

3. Доказано, что давление и напряжение разряда обладают свойством взаимокompенсации. Это позволяет за счет увеличения расходов технологического газа сократить расходы электроэнергии, и тем самым обеспечить положительный экономический эффект.

Вышесказанное подтверждает целесообразность управления процессом распыления за счет регуляции давления.

4. Определена теоретико-экспериментальная модель зависимости скорости распыления от давления газа, способная выполнить роль целевой функции при регулировании давления с учетом максимизации скорости распыления применительно к установке магнетронного напыления UniCoat 400.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетаев В. А., Кожина Т. Д. Разработка и внедрение наноструктурированных покрытий при изготовлении деталей газотурбинных двигателей // *Инновации*. 2007. № 12. С. 89–91.

2. Федотов А. В., Агабеков Ю. В., Мачикин В. С. Многофункциональные нанокompозитные покрытия // *Наноиндустрия*. 2008. № 1. С. 24–26.

3. Ключарев А. Н., Мишаков В. Г., Тимофеев Н. А. Введение в физику низкотемпературной плазмы. СПб.: СПбГУ, 2008. 214 с.

4. Райзер Ю. П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1992. 536 с.

5. Григорьев Ф. И. Осаждение тонких пленок из низкотемпературной плазмы и ионных пучков в технологии микроэлектроники. М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2006. 35 с.

6. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 576 с.

7. Кабардин О. Ф. *Физика*. М.: АСТРЕЛЬ, 2005. 416 с.

8. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

9. Прохоров А. М. *Физическая энциклопедия*. М.: Сов. энциклопедия, 1988. Т. 1. 704 с.

10. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. К.: Аверс, 2008. 224 с.

ОБ АВТОРЕ

ДРУЖКОВ Станислав Сергеевич, асс. каф. резания материалов, станков и инструментов им. С. С. Силина. Дипл. инж.-технолог (РГАТА, 2009). Канд. техн. наук по оборуд. и технол. мех. и физ.-техн. обработки (РГАТУ, 2012). Иссл. в обл. оптимиз. проц. магнетронного распыления.

METADATA

Title: Mathematical modeling of magnetron dispersion process.

Authors: S. S. Druzhkov.

Affiliation: Rybinsk State Aviation Technical University, Russia.

Email: drugkov.s.s@rambler.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 8 (61), pp. 128-133, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Results of pilot studies on receiving mathematical model of speed of process of magnetron dispersion on the basis of which the way of increase of intensity of process due to optimization of pressure of gas in the vacuum camera on dispersion speed is offered are presented.

Key words: magnetron dispersion; productivity; optimization; working pressure; parametrical dependences.

References (English transliteration):

1. V. A. Poletayev and T. D. Kozhina, "Development and introduction of the nanostructured coverings at production of details of gas-turbine engines," *Innovations*, no. 12, pp. 89-91, 2007.

2. A. V. Fedotov, Yu. V. Agabekov, and V. S. Machikin, "Multipurpose nanocomposite coverings," *Nanoindustry*, no. 1, pp. 24-26, 2008.

3. A. N. Klyucharev, V. G. Mishakov, and N. A. Timofeyev, *Introduction in physics of low-temperature plasma*. Sankt-Petersburg: St. Petersburg State University, 2008.

4. Yu. P. Rayzer, *Physics of the gas discharge*. Moscow: Nauka, 1992.

5. F. I. Grigoryev, *Sedimentation of thin films from a low temperature plasma and ionic bunches in technology of microelectronics*. Moscow: Moscow State Electronics and Mathematics Institute, 2006.
6. A. I. Morozov, *Introduction in plasma dynamics*. Moscow: FIZMATLIT, 2006.
7. O. F. Kabardin, *Physics*. Moscow: ASTREL, 2005.
8. A. A. Spiridonov, *Experiment planning at research of technological processes*. Moscow: Mashinostroenie, 1981.
9. A. M. Prokhorov, *Physical Encyclopedia*. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1988 . Т. 1.
10. A. I. Kuzmichov, *Magnetron raspylitelny systems*. Book 1. *Introduction in physics and equipment of magnetron dispersion*. Kiev: Avers, 2008.

About author:

DRUZHKOV, Stanislav Sergeevich, assistant to chair of cutting of materials, machines and tools. Dipl. engineer (RGATA, 2009). Candidate of Technical Sciences (RGATU, 2012). Researches in the field of optimization of processes of magnetron dispersion.