

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА КОМПОНОВКИ СИСТЕМЫ МАГНЕТРОННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

О.Э. Алиханов, А.И. Беликов, Р.И. Зайнуллин

АННОТАЦИЯ

Представлена методика выбора компоновки технологической системы вакуумной установки магнетронного нанесения тонкопленочных покрытий на детали сложной формы. Для расчета равномерности нанесения покрытий на детали использовалась разработанная авторами программа моделирования процесса магнетронного нанесения покрытий «TFDepositionR». Приведены результаты моделирования для различных вариантов компоновки внутрикамерной системы. Выбор предпочтительной компоновки осуществлялся на основе таких критериев, как обеспечение требуемой равномерности покрытий на деталях и повышенная технологическая производительность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МАГНЕТРОННОЕ НАНЕСЕНИЕ, ПОКРЫТИЕ, ВАКУУМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

MAGNETRON DEPOSITION SYSTEM LAYOUT SELECTION FOR THE COMPLEX SHAPE PARTS COATS BY THE COMPUTER MODELING

O.E. Alihanov, A.I. Belikov, R.I. Zainullin

ABSTRACT

The method of choosing the technological system layout of a vacuum installation for magnetron deposition thin-film coatings on complex shape parts is presented. To calculate the uniformity of coating on the parts, the authors used the "TFDepositionR" program for modeling the magnetron coating process. The modeling results for various variants of the in-chamber layout system are presented. The choice of the preferred layout was carried out on the basis of such criteria as ensuring the coatings required uniformity on parts and increased technological productivity.

KEYWORDS

COMPUTER MODELING, MAGNETRON DEPOSITION, COATING, VACUUM EQUIPMENT

ВВЕДЕНИЕ

Расширение номенклатуры изделий, на которые необходимо наносить тонкопленочные покрытия методом магнетронного распыления мишени в вакууме, с обеспечением при этом высоких требований к их равномерности, требует создания эффективных инструментов моделирования процесса осаждения на произвольные 3D-объекты. Эффективность в данном случае определяется, как возможность в кратчайшие сроки выбрать оптимальное компоновочное решение технологической системы, обеспечивающее высокую производительность при соблюдении требований по равномерности покрытия. Наиболее остро проблема отсутствия инструментов моделирования процессов осаждения покрытий проявляется в случаях, когда изделиями

являются крупноразмерные объекты сложной пространственной конфигурации и/или традиционные технологические решения (например, использование многопозиционной технологической оснастки с планетарной схемой движения изделий) не применимы, требуются расчеты. В этих случаях, при определении оптимального взаимного расположения источника и изделия, невозможно использовать упрощенные аналитические модели, основанные на интегрировании потоков, распыляемых с элементарных участков мишени и осаждающихся на участки поверхности объекта на основе простых форм.

При создании универсального инструмента решения подобного рода задач использовался дискретный подход, на основе которого авторами была разработана программа «TFDepositionR» (свидетельство о регистрации RU2022685121) [1]. Программа формирует распределение толщины покрытия, осажденного путем распыления мишени, за некоторое время, на поверхность модели произвольного 3D-объекта, представленного триангулярной сеткой. На базе имеющейся экспериментальной установки магнетронного нанесения покрытий проводилась апробация программы, по результатам которой была подтверждена корректность примененных подходов и разработанных алгоритмов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫЕ ВАРИАНТЫ

В рамках работ по созданию технологической системы для серийного нанесения покрытий на компоненты бланкета ИТЭР, на начальном этапе, одной из задач являлся выбор оптимального компоновочного решения внутрикамерной оснастки оборудования для реализации процесса магнетронного нанесения покрытия на изделие – крупногабаритный болт. При реализации проекта основной сложностью являлось наличие большой номенклатуры изделий, которые, помимо рассматриваемого варианта, также должны были покрываться на той же установке. Поэтому, при выборе окончательной компоновки технологической системы вакуумной установки принимался во внимание и этот фактор, а именно – возможность быстрой переналадки под другие изделия.

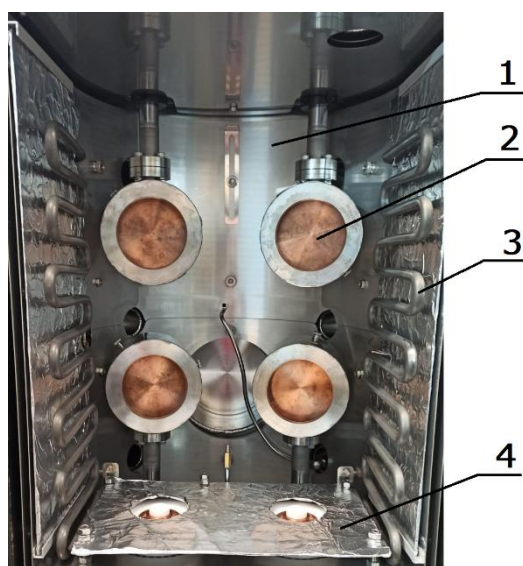
В качестве базовых ограничений модели выступали габаритные размеры конкретной вакуумной камеры (D-образная форма с радиусом полуокружности в основании 200 мм и высотой 600 мм), а также размер и форма распыляемых мишеней (дисковые, Ø78 мм) из дисульфида молибдена, изготавливаемых методом изостатического прессования порошка. Предпочтительная компоновка выбиралась под изделие – болт М64 длиной около 220 мм. Поверхности под покрытие – резьбовая часть длиной около 95 мм и поверхность под шляпкой болта, в соответствии с техническим заданием – допуск по неравномерности покрытий.

Таким образом, для выбора оптимальной компоновки требовалось с учетом имеющихся ограничений обеспечить размещение в камере рассматриваемых изделий и осаждение на указанные поверхности покрытий с неравномерностью, укладываемой в допуск, при этом обеспечить максимально возможную цикловую производительность. Кроме того, изделия являются телом вращения и обладают большой массой (более 5 кг), что критично для выбора конструкции оснастки, обеспечивающей, как их вращение, так и, дополнительно, подачу потенциала смещения, необходимого для предварительной ионной обработки поверхностей.

На основе обобщения требований технического задания и имеющихся ограничений была предложена концепция с использованием в технологической системе четырех планарных магнетронов с дисковыми мишенями (рисунок 1). Во внутреннем пространстве

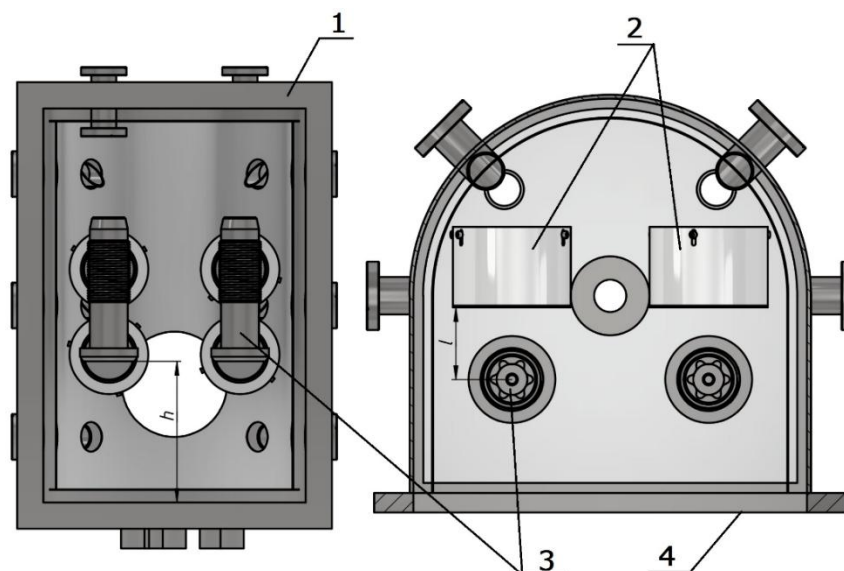
камеры размещались магнетроны, для которых вводы в вакуум обеспечивали возможность их смещения вверх-вниз, вращение вокруг вертикальной оси ввода, а также возможность изменения наклона оси магнетрона (нормаль к поверхности мишени) в вертикальной плоскости. Исходя из такого базового варианта компоновки магнетронов, варьируемыми факторами технологической системы являлись:

- 1) варианты размещения изделий, включая их количество и особенности расположения на базовой платформе (4), рисунок 1;
- 2) координаты расположения магнетронов относительно изделий по вертикальной оси;
- 3) углы поворота осей магнетронов в горизонтальной плоскости (с учетом симметрии системы);
- 4) углы поворота осей магнетронов в вертикальной плоскости (попарно).



1 – D-образная вакуумная камера; 2 – магнетрон с планарной дисковой мишенью; 3 – нагреватель (ТЭН); 4 – базовая платформа с приводом для размещения изделий.

Рисунок 1 – Внутреннее пространство вакуумной камеры со стороны двери камеры.



1 – Фланец дверного разъёма вакуумной камеры; 2 – магнетроны, расположенные в рабочих позициях; 3 – изделие типа болт; 4 – дверной проём камеры, рабочее пространство со стороны оператора установки для размещения изделий.

Рисунок 2 – Вариант компоновки №1, размещение двух изделий напротив двух пар магнетронов. Слева – главный вид на камеру, справа – вид сверху.

В части первого варьируемого фактора – возможных компоновочных решений, рассматривались три различных варианта схемы расположения изделий-болтов:

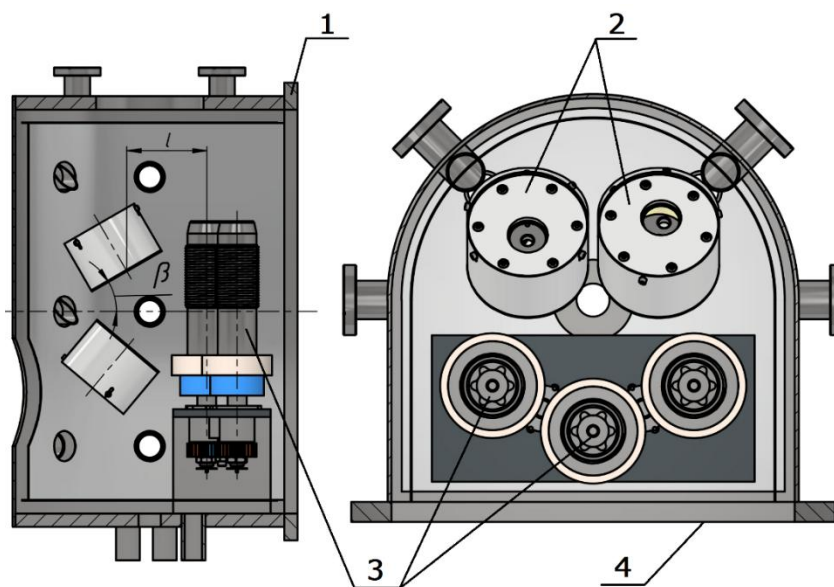
1. вариант №1 схемы компоновки (рисунок 2) предусматривает размещение двух изделий, каждое из которых располагается напротив пары магнетронов;
2. вариант №2 (рисунок 3) предусматривает размещение трех изделий, два крайних изделия располагаются вблизи пары магнетронов, а третье – между ними, на большем удалении от магнетронов;
3. в варианте №3 (рисунок 4) предполагается возможное размещение четырех изделий, каждое из которых располагается напротив одного магнетрона.

В варианте №1 использование верхнего магнетрона обеспечивает преимущественное осаждение покрытия на резьбовую часть, некоторая часть потока осаждается также на поверхность шляпки болта, обращенную к резьбе. Основные требования к покрытию на резьбовой части, для всех вариантов, – обеспечение необходимых значений толщины покрытия на стороне витков резьбы, обращенных к шляпке. Нижний магнетрон, расположенный ближе к шляпке болта, обеспечивает преимущественное осаждение покрытия на её нижней поверхности, незначительная часть потока попадает на витки резьбы. При моделировании такой конфигурации системы магнетроны не поворачивались в горизонтальной и вертикальной плоскостях, их оси располагались перпендикулярно плоскости, образуемой осями болтов. Учитывались конструктивные ограничения, связанные с размещением магнетронов в камере. Основными варьируемыми параметрами было расположение магнетронов по вертикали, со смещением их в позициях «вверх-вниз» относительно положения болта.

Для варианта компоновки №2 предполагалось использовать наибольшее количество варьируемых параметров, а именно: смещение позиций магнетронов по вертикальной координате, изменение углов наклона осей в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Основная идея такой компоновки предполагала

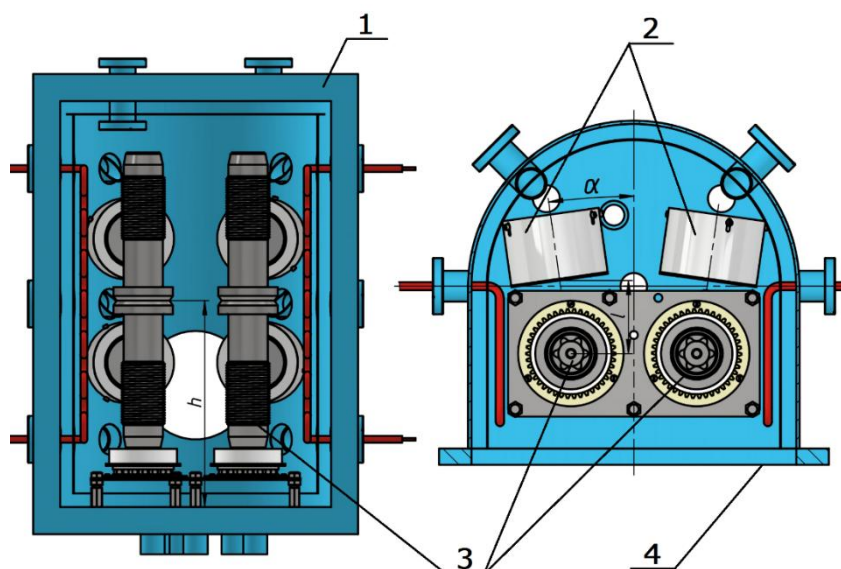
преимущественное осаждение основного потока на периферийные болты и осаждение частей потоков из всех магнетронов на центральный болт. В таком варианте требовалось найти такое удаленное положение центрального болта, чтобы суммарная скорость осаждения соответствовала скорости осаждения на периферийных болтах. Наклоны осей магнетронов в вертикальной плоскости обеспечивали преимущественное осаждение потоков материала на соответствующие поверхности резьбы и поверхность шляпки. Угол поворота магнетронов в горизонтальной плоскости обеспечивал изменение распределения потоков на ближайший периферийный и удаленный (центральный) болт. Потенциально, такая схема обеспечивает и более рациональное использование потоков распыленного материала. Однако, наклон магнетронов в вертикальной плоскости, при учёте их габаритов, приводит к их удалению от изделий, что снижает скорость осаждения. Конструктивные ограничения, связанные с размещением изделий и магнетронов в камере, сказывались на диапазонах варьирования.

Для повышения производительности было предложено использовать в загрузке, на один цикл нанесения покрытия, сразу четыре болта, расположенных друг над другом в компоновке по варианту №3. В таком варианте каждый магнетрон размещён напротив соответствующего болта, распыляемый поток осаждается и на поверхности резьбы и на плоскость под шляпкой. При проработке такого варианта конфигурации системы использовалось варьирование углом поворота магнетронов в горизонтальной плоскости, поиск расположения магнетрона (по вертикальной координате) относительно болта для обеспечения сопоставимых скоростей осаждения на резьбу и шляпку, а также вариант более предпочтительной ориентации болтов (шляпками друг к другу, или – наоборот). Основным недостатком рассматриваемой компоновки является нерациональное использование потока распыленного материала мишени, однако, в меньшей степени сказываются конструктивные ограничения, связанные с габаритами и размерами компонентов системы.



1 – Фланец дверного разъёма вакуумной камеры; 2 – магнетроны, расположенные в рабочих позициях; 3 – изделия типа болт; 4 – дверной проём камеры.

Рисунок 3 – Вариант компоновки №2, размещение трёх изделий со смещением центральной позиции: слева – разрез на боковой проекции камеры, справа – вид сверху.



1 – Фланец дверного разъёма вакуумной камеры; 2 – магнетроны, расположенные в рабочих позициях; 3 – изделия типа болт; 4 – дверной проём камеры.

Рисунок 4 – Вариант компоновки №3, размещение четырёх изделий напротив двух пар магнетронов: слева – главный вид на камеру, справа – вид сверху.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ И РАСЧЕТ КОМПОНОВОК

В соответствии с предложенными вариантами компоновки технологической системы и выбранными для каждой из них варьируемыми параметрами были подготовлены модели на основе компонентов системы: 3D-модели изделия на основе триангулированной полигональной сетки и проектной области распыления на поверхности мишени магнетрона. Параметры распыления и форма проектной области распыления (область эрозии) задавались в программе, интерфейс для их настройки показан на рисунке 5. Толщина покрытия определялась исходя из времени осаждения равного 6 часам, требуемая скорость осаждения – 1 мкм/ч.

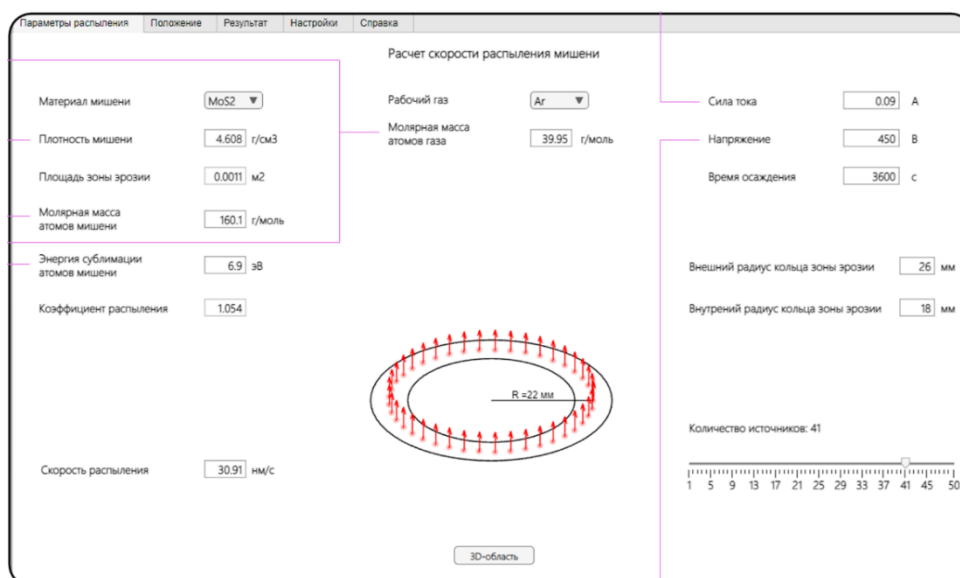
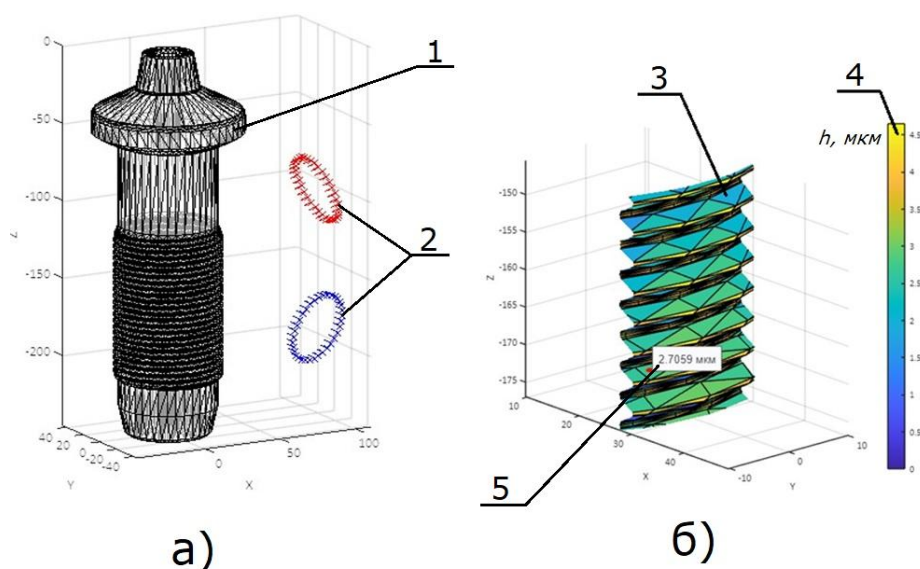


Рисунок 5 – Интерфейс формы настройки параметров распыления мишени.

Далее, для каждого варианта компоновки выбирались параметры взаимного расположения изделия и магнетронов (распыляемых областей, приведенных к массиву точечных источников), пример визуализации такой модели для варианта №2 показан на рисунке 6а. Для формирования полной картины выполнялось также и суммирование потоков от тех магнетронов, которые находятся на большом удалении от болта (на рисунке 6а представлена ближняя пара магнетронов). В результате расчета по модели программа обеспечивает вывод данных в форме кодированного цветом распределения толщины на элементарных участках поверхности изделия (треугольники сетки модели), как показано на рисунке 6б для фрагмента резьбовой поверхности (3). Рядом выводится кодовая шкала цвета (4), выбором соответствующего треугольника на поверхности изделия можно вывести конкретное значение толщины на этом участке (5).



1 – Модель изделия в трехмерной координатной сетке программы; 2 – области распыления магнетронов, расположенных в позициях модели; 3 – результаты для фрагмента изделия, представленные цветовой кодировкой толщины; 4 – цветовая шкала толщины; 5 – конкретное значение толщины в точке поверхности.

Рисунок 6 – интерфейсы программы моделирования: а) – 3D-модель изделия в координации с областями распыления мишеней, б) – результаты расчета для фрагмента поверхности резьбы.

С целью снижения временных затрат на компьютерную обработку варианта расчета, использовались не полноценная модель болта, а только интересующие поверхности (витки резьбы и поверхность под шляпкой). Для автоматизации процесса выполнения расчетов, с учетом большого количества разных наборов варьируемых параметров компоновок, реализовывалось межплатформенное взаимодействие (рисунок 7) путем ввода блока считывания параметров из электронной таблицы Excel, в которой построчно прописывались наборы данных для каждого варианта (таблица 1).

Схема взаимодействия между платформами



Рисунок 7 – Схема организации межплатформенного взаимодействия, использованная для автоматизации процесса просчета вариантов с варьируемыми параметрами компоновок.

В таблице 1 приведен фрагмент электронной таблицы, используемой для просчета варианта компоновки №2 с различными варьируемыми параметрами, такими, как: углы поворота магнетронов в горизонтальной (столбец №1) и вертикальной (столбец №2) плоскостях, координаты расположения магнетронов и изделий (столбцы №№ 3-9). Полученные расчетные значения толщины записывались в столбцы №№10-13 для: шляпки болта, ближнего, среднего и дальнего витков резьбы. Также определялись: среднее значение (столбец №14) и среднеквадратичное отклонение (столбец №15).

Таблица 1

Фрагмент набора расчетных значений и результатов расчета для варианта компоновочного решения №3

alf1, °	bet1, °	X1, мм	Y1, мм	Z1, мм	BX1, мм	BZ1, мм	BX2, мм	BZ2, мм	B1_Шляпка, мкм	B1_Резьба 1, мкм	B1_Резьба 2, мкм	B1_Резьба 3, мкм	ХсрB1, мкм	S ² БР1-3
270	90	65	500	20	100	-50	0	-50	5,749	4,348	1,716	5,053	3,706	3,093
270	90	65	500	20	100	-75	0	-75	4,097	3,542	2,556	3,689	3,262	0,380
270	90	65	500	20	100	-100	0	-100	3,274	2,686	2,496	3,03	2,737	0,073
270	90	65	500	20	100	-125	0	-125	2,696	2,09	2,205	2,565	2,287	0,061
270	90	65	500	20	100	-150	0	-150	2,252	1,672	1,882	2,178	1,911	0,065
255	90	65	500	20	100	-50	0	-50	7,072	3,841	1,421	5,419	3,560	4,055
255	90	65	500	20	100	-75	0	-75	4,266	3,449	2,344	3,755	3,183	0,551
255	90	65	500	20	100	-100	0	-100	3,287	2,646	2,411	3,019	2,692	0,094
255	90	65	500	20	100	-125	0	-125	2,675	2,054	2,153	2,532	2,246	0,064
255	90	65	500	20	100	-150	0	-150	2,222	1,641	1,844	2,147	1,877	0,065
240	90	65	500	20	100	-75	0	-75	4,211	3,036	1,861	3,539	2,812	0,742
240	90	65	500	20	100	-100	0	-100	3,079	2,41	2,137	2,781	2,443	0,104
240	90	65	500	20	100	-150	0	-150	2,04	1,5	1,675	1,963	1,713	0,055
225	90	65	500	20	100	-80	0	-80	3,285	2,206	1,43	2,688	2,108	4,03
225	90	65	500	20	100	-100	0	-100	2,549	1,91	1,657	2,261	1,943	0,092
225	90	65	500	20	100	-125	0	-125	2,043	1,53	1,568	1,904	1,667	0,042
225	90	65	500	20	100	-150	0	-150	1,692	1,233	1,373	1,622	1,409	0,039
210	90	65	500	20	100	-80	0	-80	2,231	1,2	0,9098	1,597	1,236	0,119
210	90	65	500	20	100	-100	0	-100	1,642	1,131	1,045	1,424	1,200	0,039
210	90	65	500	20	100	-125	0	-125	1,382	0,9978	1,053	1,283	1,111	0,023
210	90	65	500	20	100	-150	0	-150	1,183	0,8427	0,9533	1,132	0,976	0,021
270	105	65	500	20	100	-50	0	-50	5,328	4,362	2,342	4,57	3,758	1,515
270	105	65	500	20	100	-75	0	-75	3,992	3,8	2,756	3,641	3,399	0,316
270	105	65	500	20	100	-100	0	-100	3,33	2,921	2,736	3,121	2,926	0,037

На основании результатов моделирования проводился анализ, в котором учитывались значения неравномерности покрытия, а также толщины, т.е. скорости осаждения покрытия, характеризующие технологическую производительность. Для каждого варианта компоновки выбиралась наилучшая совокупность параметров, которая обеспечивала бы низкую неравномерность толщины покрытия и при этом высокую скорость осаждения покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщение результатов компьютерного моделирования по всем вариантам компоновок подтвердило выдвинутые предположения. Вариант №1 обеспечивает наиболее низкую неравномерность покрытий (менее 10%) и высокую скорость осаждения (около 1 мкм/ч). Вариант №2 за счет использования наклона магнетронов позволяет достичь самой высокой равномерности покрытий на периферийных болтах, однако толщина покрытий на центральном болте существенно отличается (на 25%). Вариант №2 обеспечивает самую низкую скорость осаждения (около 0.3 мкм/ч) вследствие увеличения дистанции до осаждаемой поверхности.

Наиболее предпочтительным является вариант №3, который обеспечивает достаточную равномерность покрытия на резьбовой поверхности (около 17%), что удовлетворяет требованиям технического задания. В такой компоновке обеспечивается такая же высокая скорость осаждения, как и в варианте №1. Поскольку за один цикл загрузки обрабатываются сразу четыре изделия, цикловая производительность вдвое выше, чем в первом варианте, и существенно превышает достижимое во втором варианте значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы подтверждена высокая эффективность предлагаемых инструментов и решений, обеспечивающих проработку большого объема разноплановых компоновок с различными геометрическими параметрами. Данная методика обеспечивает снижение временных затрат на выбор и проектирование оптимальных компоновок технологических систем вакуумного оборудования нанесения тонких пленок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свидетельство 2022685121. Программа моделирования магнетронного нанесения тонких пленок на детали сложной геометрии «TFDepositionR»: программа для ЭВМ / А.И. Беликов, О.Э.Алиханов (RU). № 2022684191; заявл. 06.12.22; опубл. 21.12.2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алиханов Орхан Эльдар Оглы – магистр (ORCID: 0000-0002-3218-4962). МГТУ им.Н.Э.Баумана, г.Москва. e-mail: orhan.alihanov@gmail.com

Беликов Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент (ORCID: 0000-0003-1036-9058). МГТУ им.Н.Э.Баумана, г.Москва. e-mail: belikov@bmstu.ru

Зайнуллин Рустам Ильшатovich – магистр (ORCID: 0009-0009-3022-1369). МГТУ им.Н.Э.Баумана, г.Москва. e-mail: rustam.zainullin@bk.ru