

УДК 621.793:62-427

EDN CMCCZQ

Поиск оптимальной концепции магнетронного напыления при нанесении покрытий на длинномерные проволочные изделия

П.Л. Жуковский¹, К.А. Зиньковский², Н.Н. Краснобаев¹, А.О. Титов¹

¹АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва

*²ООО «ФЕРРИ ВАТТ», Казань
PLZhukovsky@bochvar.ru*

В настоящей работе осуществлен поиск оптимальной концепции процесса магнетронного напыления покрытий на протяженные проволочные изделия, а также установки для его реализации. Выполнен анализ существующих подходов и установок с выявлением их достоинств и недостатков. Показано, что оптимальная установка магнетронного напыления покрытий на проволочные изделия должна опираться на конфигурацию инвертированного магнетрона, принципе многопроходности проволоки через зону осаждения и приоритет максимизации коэффициента использования материала мишени. Заложенные принципы положены в основу создания опытной установки магнетронного напыления защитных покрытий на микрокомпозиционную проволоку длиной не менее 1000 метров.

Ключевые слова: магнетронное распыление, микрокомпозиционные провода, защитные покрытия

Search for an optimal concept of magnetron sputtering coating of long wire products

P.L.Zhukovsky¹, K.A. Zinkovsky², N.N. Krasnobaev¹, A.O. Titov¹

¹JSC «A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow

*²Limited Liability Company «FERRY WATT», Kazan
PLZhukovsky@bochvar.ru*

This research explores the optimal concept for magnetron sputtering coating of long wire products, as well as the optimal installation. Existing approaches and installations are analyzed, identifying their advantages and disadvantages. It is shown that an optimal setup for magnetron sputtering coating of wire products should be based on the inverted magnetron concept, the principle of multiple wire passes in the sputtering zone, and the priority of achieving maximum target material utilization. These principles will be used to develop a pilot setup for magnetron sputtering coating of microcomposite wire at least 1000 meters long.

Keywords: magnetron sputtering, microcomposite wires, protective coatings

Введение

Микрокомпозиционные медь-ниобиевые провода представляют собой передовые материалы, обладающие высокой прочностью и пластичностью, термо- и износостойкостью, что делает их исключительно подходящими для создания высокопольных пульсирующих магнитов (до 100 Т), устройств ядерного магнитного резонанса с полями 15–20 Тл, электрических сетей под экстремальными силами, а также армирующих вставок для сверхпроводников типа

Nb₃Sn [1]. Эти провода используются в ускорителях частиц, термоядерных реакторах и MRT-аппаратах, где требуется устойчивость к электрическому пробое и дезинтеграции. Однако для практического использования таких проводов необходимы покрытия, которые защищают их от окисления, улучшают паяемость и, в целом, увеличивают их механическую надежность. Наиболее востребовано Ni-покрытие, обеспечивающее надежную коррозионную защиту для основной массы кабельно-проводниковой продукции. Покрытых никелем проводов

в мире производится около 10 000 тонн ежегодно. Для особо важных применений, в том числе в микроэлектронике, применяют покрытия из Ag, обладающие кроме высокой коррозионной стойкости наивысшей электропроводностью (на 6% выше, чем у Cu). Здесь необходимо заметить, что в отличие от никелевого покрытия, которое является анодным по отношению к медному проводу, серебряное покрытие – катодное, что обуславливает высокие требования по плотности, сплошности и отсутствию макродефектов.

На сегодняшний день основным методом нанесения покрытий на кабельно-проводниковую продукцию, включая микрокомпозиционные провода, является гальванический метод. В ходе формирования покрытий гальваническим методом происходит выделение токсичных паров, опасных для здоровья человека. Вода, используемая в производстве, загрязняется различными веществами (тяжелые металлы, кислоты, щелочи) и требует очистки. Также нанесение гальванических покрытий представляет собой производство, вредное для окружающей среды, поэтому предполагает разработку норм организации производственного процесса [2,3]. Проблема гальванических покрытий состоит также в их недостаточном качестве. Например, в процессе отжига проводов никелевое покрытие теряет свою первоначальную форму, приобретает значительные формоизменения, связанные, по-видимому, с газовыделением захваченных в процессе роста покрытия примесей из электролита. Эффекты деградации гальванических покрытий могут быть связаны с наличием неметаллических примесей в электролитическом покрытии, в частности газовых, что приводит к появлению вздутий на поверхности при высоких температурах. Особо отмечено перераспределение никеля – от равномерного слоя к островковым участкам большой толщины, отсюда их неравномерная толщина. В связи с этим высокую целесообразность приобретает разработка альтернативной экологически чистой технологии, такой как ионно-плазменное магнетронное распыление.

Ионно – плазменное магнетронное распыление позволяет получать защитные покрытия с характеристиками, значительно превосходящими характеристики покрытий, полученных гальванической технологией [4,5]. Кроме того, метод отличается отсутствием поверхностных макродефектов, таких как несплошности, поры, вздутия и наличие капельной составляющей, и является экологически чистым. Тем не менее применение метода магнетронного распыления

для напыления защитных покрытий на проволочные изделия (как альтернативы гальванической технологии) требует разрешения ряда проблем, связанных с обеспечением конкурентоспособной скорости нанесения покрытий, эффективности и стабильности процесса.

Решение данных проблем связано с поиском оптимального расположения магнетронных модулей и оптимальной конструкции самого магнетрона. Ранее исследователями [6-11] уже предпринимались попытки использования магнетронного распыления для нанесения покрытий на проводниковые изделия и были предложены различные подходы по организации процесса напыления, имеющие свои достоинства и недостатки.

Целью настоящего исследования является выявление оптимальной концепции процесса магнетронного распыления для нанесения покрытий на проволочные изделия, позволяющего достичь необходимых конкурентоспособных условий: производительности (получение, как минимум, одного километра покрытых проволочных изделия за один технологический цикл), стабильности и эффективности процесса с сохранением основных достоинств магнетронного распыления, таких как высокие качество и свойства формируемых покрытий. Здесь необходимо пояснить, что под термином «оптимальная концепция» понимается концепция, предлагающая не только лучшее качество покрытий, но и обеспечивающая конкурентоспособность с гальванической технологией. Нанесение покрытий дорогостоящих материалов, таких как Ag, методом магнетронного распыления на тонкую металлическую проволоку представляет собой малоэффективный и ресурсозатратный технологический процесс (ввиду малых размеров проволоки), особенно в сравнении с гальванической технологией, которая сама по себе предлагает более дешевое производство. Поэтому главным приоритетом, в рамках задач настоящего исследования, является достижение максимальной эффективности процесса напыления путем увеличения коэффициента использования материала мишени, заполнения максимально возможного пространства проволокой в зоне напыления и снижения затрат на изготовление мишеней.

Существующие концепции нанесения покрытий на проволочные изделия методом магнетронного распыления

Нанесение покрытий на проволочные изделия методом ионно – плазменного магнетронного распыления может быть осуществлено

различными компоновками магнетронов. Как уже было сказано, основными критериями для их оценки являются производительность, стабильность и эффективность процесса распыления. Ниже будут рассмотрены основные возможные концепции магнетронов.

Концепция Face-to-face

Данная концепция предполагает конфигурацию магнетрона, при которой две мишени расположены параллельно друг напротив друга, а подложка, в нашем случае представляющая собой перемещающуюся проволоку, находится между ними в зоне плазменного облака (рис. 1.). Магнитная конфигурация устроена таким образом, что силовые линии магнитного поля замыкаются от одной мишени к другой, обуславливая удержание электронов и ионов в объеме между мишенями.

К достоинствам данной концепции можно отнести относительную простоту по сравнению с другими схемами, представленными ниже: отсутствие перегрева проволоки в процессе напыления, стабильность процесса напыления, низкие затраты на изготовление мишеней, а также однородное распределение толщины покрытия по длине проволоки. Ключевым её недостатком является низкий коэффициент эффективного использования (КЭИ) материала мишени, который определяется как соотношение количества материала, осаждающегося на проволоку, к общему количеству распыленного материала.

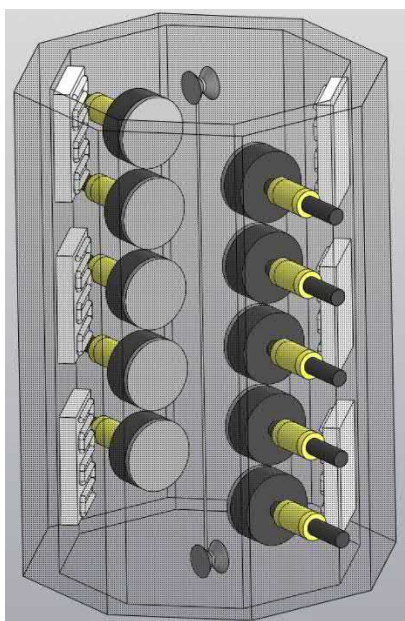


Рис. 1. Компоновка схемы напыления face-to-face

Схема напыления face-to-face была опробована авторами настоящего исследования [6]. С помощью макета перемоточного устройства была получена партия образцов проволоки длиной от 3 до 5 метров с Ag покрытием толщиной от 4 до 6 мкм. Скорость напыления покрытия Ag составила от 1,5 мкм/мин. до 2,0 мкм/мин.

Для оценки распределения толщины покрытия по длине образца был проведен эксперимент по нанесению покрытия серебра из круглой мишени Ø60 мм на плоскую медную пластину (рис. 2). Далее, методом рентгенофлуоресцентного анализа определялась толщина покрытия по всей длине образца и строилась гистограмма распределения по толщине.



а)



б)

Рис. 2. Эксперимент по определению толщины серебряного покрытия при распылении мишени Ø60 мм на расстоянии 80 мм от подложки: а) магнетрон с серебряной мишенью и медная пластина в оснастке; б) пластина с серебряным покрытием

Анализ полученных данных указывает на то, что основная зона осаждения покрытия локализована в пределах 80 мм от центральной точки (рис. 3). За пределами данной зоны интенсивность распыления существенно снижается, а на расстоянии 200 мм и более осаждение покрытия не наблюдается. Тем не менее благодаря

применению перемоточного устройства каждый участок проволоки последовательно проходит через зоны различной интенсивности плазменного облака, что обеспечивает равномерное распределение толщины покрытия. Высокая степень равномерности распределения покрытия по толщине подтверждена в работе [6].

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СЕРЕБРЯНОГО ПОКРЫТИЯ ПО ДЛИНЕ ОБРАЗЦА

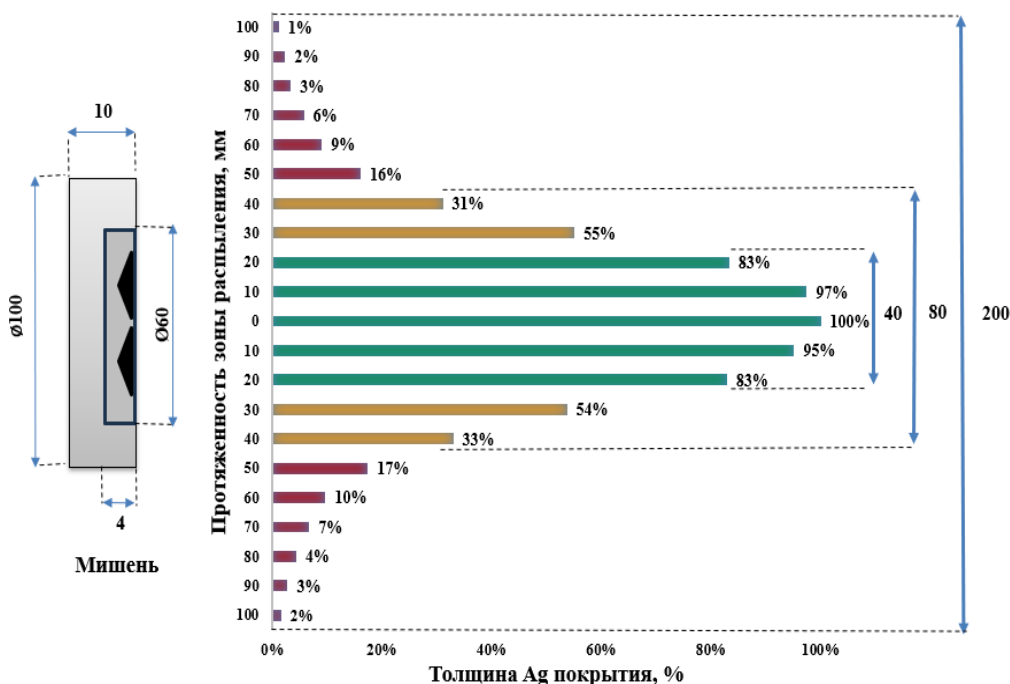


Рис. 3. Характер распределения толщины серебряного покрытия по длине образца

Данная схема отличается своей простотой реализации, стабильностью процесса и воспроизводимостью результатов. Возможность приложения высоких плотностей мощности позволяет достигать необходимой производительности (ориентировочно, 12 часов напыления для нанесения Ag покрытия толщиной 5 мкм на 1000 метров проволоки). Однако главный недостаток данной схемы, заключающийся в низком КЭИ и осаждении большей части распыленного материала на стенки камеры, приводит к большим потерям. Кроме того, эффект перераспыления, возникающий при осаждении распыленного материала на поверхность противоположной мишени, при реализации этой схемы будет наиболее низким. Для данной схемы был проведен расчет коэффициента перераспыления в программе SIMTRA (рис.4). SIMTRA — программа, предназначенная для моделирования потока металла во время магнетронного распыления при по-

мощи метода Монте-Карло. Используя predetermined поверхности, пользователь может создать геометрическое представление своей экспериментальной установки, которое визуализируется графическим пользовательским интерфейсом. Движение ряда частиц, сгенерированных с начальными условиями (положение, энергия и направление) от заданной поверхности, отслеживается до тех пор, пока они не пересекут одну из определенных поверхностей. Расчет проводился для схемы face-to-face, состоящей из 5 пар магнетронов Ø60 мм, при расстоянии между магнетронами 160 мм. Проволоки располагались на диаметре 56 мм – диаметре зоны эрозии мишени. Расстояние между магнетронами 20 мм. Результаты расчета показали, что на эффект перераспыления приходится от 13% до 15% распыленных атомов, что в 3 – 4 раза меньше, чем при использовании цилиндрических магнетронов.

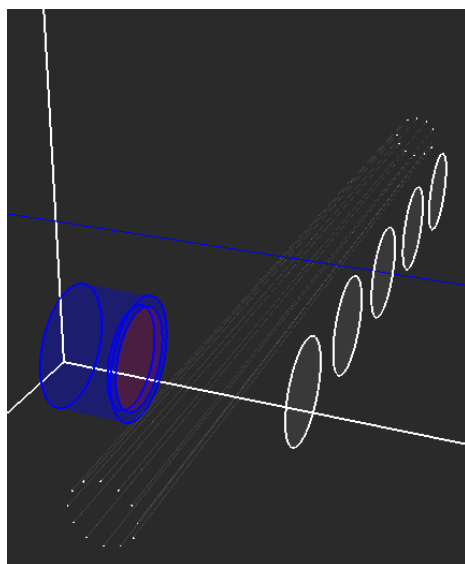
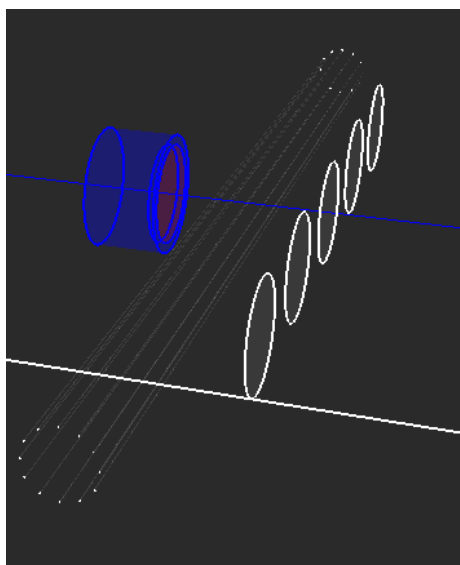


Рис. 4. Расчет эффективности компоновки Face-to-Face:
а) для центрального магнетрона;
б) для крайнего магнетрона

Квадрупольная схема распыления

Возможность развития схемы face-to-face путем установления четырех магнетронов, расположенных по периметру вакуумной камеры, позволяет сохранить все её достоинства и при этом повысить КЭИ за счет большего влияния фактора перераспыления, однако данная схема по совокупности своих характеристик не является оптимальной (рис. 5.). Применение данной схемы обеспечивает повышение коэффициента перераспыления до 22–25 % по сравнению со схемой face-to-face, однако этого всё ещё недостаточно для рассмотрения процесса распыления как эффективного.

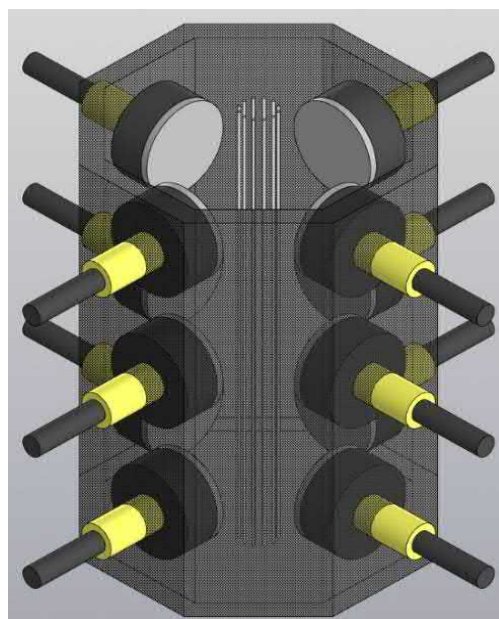


Рис. 5. Компоновка по квадрупольной схеме

Инвертированное магнетронное распыление

Использование инвертированного, или обращенного, магнетрона для нанесения покрытий на проволочные изделия, на первый взгляд, представляется наиболее оптимальным, что подтверждается большим количеством исследований с использованием магнетронов данного типа [7-11]. В этой конструкции магнитная система расположена с наружной стороны магнетрона, и распыление с мишеней происходит внутрь магнетрона, где перемещается проволока, на которую осаждается покрытие, а распыленные атомы с поверхности мишени и не осевшие на проволоку будут осаждаться на другой мишени и повторно распыляться. При этом коэффициент использования материала мишени может достигать 50-70%. Такая конструкция позволяет добиться высокого соотношения величины осажденного на подложку материала к распыленному материалу.

В патенте RU 2 788 878 C1 [7] описано нанесение покрытий на движущуюся металлическую проволоку в инвертированной магнетронной распылительной системе (MPC) с использованием компактного катода диаметром 4–6 мм и длиной 10–12 мм. Скорость протяжки проволоки варьируется от 2 до 16 мм/с. Средняя толщина медного покрытия на проволоке диаметром 40 мкм за один проход, определенная методом взвешивания, составляет 55–60 нм. Для стабильности магнетронного разряда в конструкции применяются два торцевых анода.

В патенте RU 2 829 751 C1 [8] описано нанесение покрытия на гибкое изделие в виде металлической проволоки или оптоволокна в магнетронной распылительной системе, включающей цилиндрический катод с водяным охлаждением, аноды и соленоид. Диаметр катода — 74 мм, длина — 74 мм; внутренний диаметр анодов — 41 мм. Скорость перемещения проволоки составляет 2–4 м/мин. При мощности разряда 1,0–1,5 кВт за три прохода толщина никелевого покрытия достигает 35–50 нм.

В работе [9] представлена конструкция магнетрона, в центральной части которого размещен катодный узел, включающий цилиндр из коррозионностойкой стали с фланцами для катода и набором магнитов. По краям магнетрона расположены анодные узлы. Между катодным и анодными узлами установлены нейтральные электроды, изолированные диэлектрическими кольцами. Фланцы магнетрона и катодный узел охлаждаются водой. Узел для создания магнитного поля состоит из 24 магнитных дисков, изготовленных из материала с высокой магнитной проницаемостью, и способен перемещаться вдоль магнетрона, обеспечивая равномерное распыление материала катода. Максимальная скорость перемещения проволоки в магнетроне достигает 2 м/мин.

В представленных выше работах обращенные МРС имеют цилиндрические катоды с внутренним диаметром порядка 10–100 мм. Отношение диаметра катода к длине составляет не более 1/3. Проволока проходит внутри магнетрона только один раз со скоростью несколько мм в секунду. При этом толщина покрытия на проволоке составляет несколько десятков нанометров. Невозможность реализовать принцип многопроходности проволоки в таких конструкциях не позволяет достичь производительности процесса напыления, необходимой для рассмотрения магнетронной технологии в качестве альтернативы гальванической.

С позиции обозначенных задач наибольший интерес представляет конструкция, предложенная в работе [10]. Катод магнетрона выполнен в виде полого цилиндра с внутренним диаметром 230 мм и высотой 140 мм. Внутри полости катода размещен анод, состоящий из 9 немагнитных стержней диаметром 10 мм, расположенных на расстоянии 45 мм от поверхности катода. Стержни зафиксированы на металлическом кольце у одного из торцов анода. Внутри анода установлен цилиндрический держатель образцов диаметром 30 мм, который с помощью специального привода вводится в зону разряда. За катодом размещена система постано-

ванных магнитов в форме двух гребенок. Магниты закреплены на магнитопроводе. Для обеспечения равномерного распыления катода магнитная система вращается вокруг оси катода с частотой около 0,1 Гц. В магнетронном разряде основное падение напряжения происходит в катодном слое. Ионная компонента тока не подвержена влиянию магнитного поля. Электронный ток от катода к аноду обеспечивается за счет поперечной диффузии и подвижности электронов. Разряд магнетрона инициируется от источника питания, стабилизирующего ток разряда в диапазоне 4–18 А. Цепь источника питания изолирована от корпуса установки.

Недостатками данного технического решения является высокая стоимость изготовления цилиндрической мишени из серебра (с внутренним диаметром 260 мм и длиной 460 мм) и применение девяти анодов внутри магнетрона, что значительно уменьшает внутреннюю зону напыления для многопроходного перемещения проволоки и снижает производительность процесса напыления. Результаты расчетов распределения распыленных атомов для концепции обращенного магнетрона, выполненные при помощи программы SIMTRA, демонстрируют прямую зависимость между соотношением длины магнетрона к его диаметру и количеством распыленных атомов, которые не будут безвозвратно потеряны и впоследствии смогут участвовать в дальнейшем перераспылении.

Увеличению эффективности процесса напыления может способствовать увеличение отношения длины магнетрона к его диаметру, что позволит сохранять больше распыляемого материала в зоне распыления. Однако увеличение длины магнетрона сопровождается возникновением технологических трудностей: обеспечение равномерного контакта мишени с водоохлаждаемой мембраной по всей её длине. Уменьшение диаметра также возможно до разумных пределов. Чрезмерно малый диаметр может привести к неудобству в обслуживании (замена мишеней) и сложностям при загрузке. Важно найти оптимальное соотношение, которое позволит обеспечить требования по экономической эффективности процесса и в то же время не приведет к ухудшению его стабильности и удобства обслуживания.

Результаты анализа существующих концепций установок нанесения покрытий методом магнетронного распыления на проволочные изделия позволяют сделать следующие выводы:

Концепции Face-to-face и квадрупольного магнетронного распыления не подходят для нанесения покрытия на проволочные изделия

ввиду их низкой эффективности. Обладая рядом приведенных достоинств, данные концепции не позволяют реализовать принцип перераспыления материала мишени, который позволит повысить коэффициент распыления и, тем самым, эффективность процесса. Наиболее подходящей концепцией для нанесения покрытий на проволочные изделия является обращенное магнетронное распыление, позволяющее достичь наилучшего соотношения количества распыленного материала к количеству материала, осажденному на подложку.

Ни одна из рассмотренных схем обращенного магнетронного распыления не удовлетворяет в полной мере требования по производительности и эффективности процесса напыления, поставленные в задачах настоящего исследования. Данные конструкции, ввиду малого соотношения диаметра катода к длине и, как следствие, недостаточного свободного пространства для размещения проволоки, не позволяют реализовать принцип её многопроходности, необходимый для повышения КЭИ материала и производительности (больше участков проволоки, одновременно находящиеся в зоне распыления, больше «полезных» участков поверхности, на которые осаждается покрытие). Кроме того, все рассмотренные кон-

струкции предполагают использование цилиндрических мишеней, изготовление которых обходится дороже планарных, что является важным критерием при распылении дорогостоящих материалов.

Таким образом, оптимальная концепция магнетронного напыления покрытий на протяженные проволочные изделия должна основываться на принципе инвертированного распыления. Кроме того, в ней необходимо реализовать принцип многократного прохождения проволоки, подобрать оптимальное соотношение длины магнетрона к его диаметру и, по возможности, отдать предпочтение планарным мишеням вместо цилиндрических с целью снижения затрат на их изготовление.

Обращенный магнетрон – восьмигранная призма

Проведенный анализ существующих концепций установок нанесения покрытий методом магнетронного распыления на проволочные изделия, а также соображения, касающиеся их возможного улучшения для решения задач настоящего исследования, позволили прийти к концепции обращенного магнетрона, представляющего собой восьмигранную призму с восемью прямоугольными мишенями, образующими распылительный модуль вакуумной установки (рис 6.).

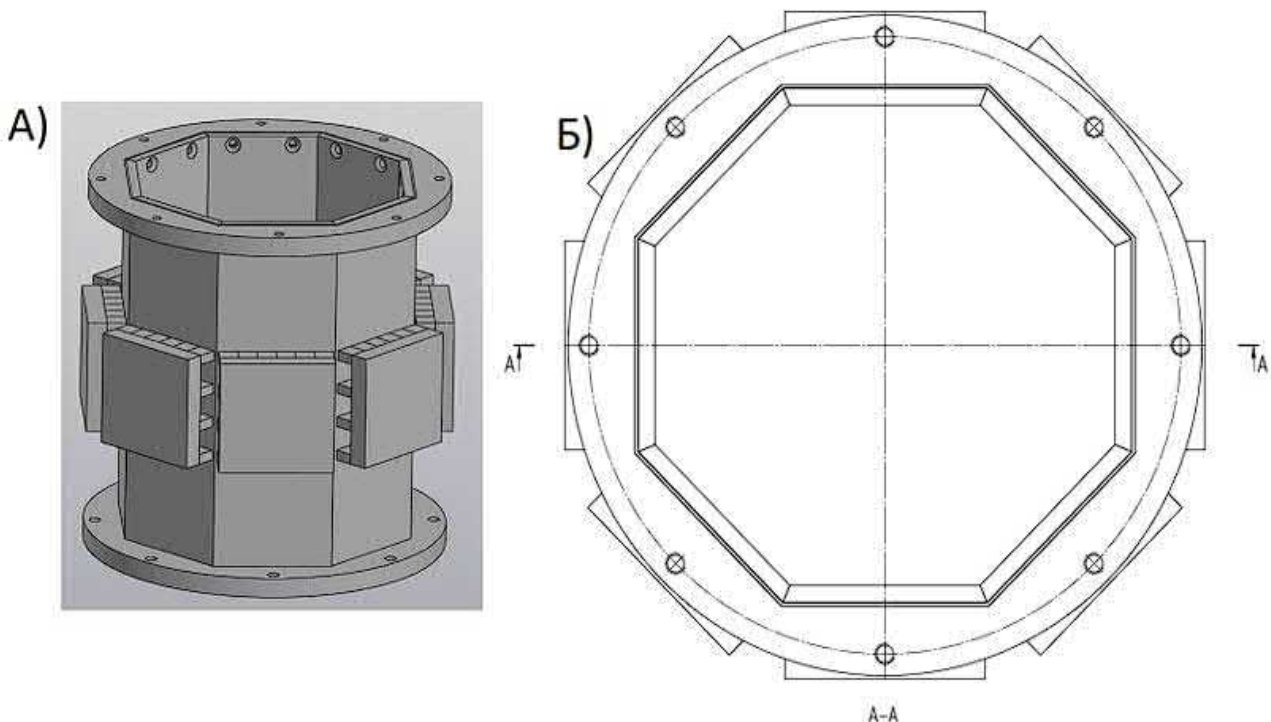


Рис. 6. Эскизная компоновка обращенного восьмигранного магнетрона: А) Трехмерная проекция; Б) Вид сверху [12,13].

Первым конструкционным решением, обуславливающим производительность и эффективность разработанного магнетронного модуля, является вертикальное расположение с соотношением величины диаметра магнетрона к длине зоны распыления не более $\frac{1}{2}$. Разработанная конструкция позволяет реализовать принцип многопроходности, создавая свободное пространство для размещения усложненного перемоточного устройства и осуществления многократного прохождения проволоки в зоне напыления.

Исходя из принципа сокращения затрат при нанесении покрытий из дорогостоящих материалов был сделан переход от цилиндрической конструкции обращенного магнетрона в сторону восьмигранной. Разработанная конструкция восьмигранной призмы позволяет использовать прямоугольные мишени, изготовление которых обходится дешевле цилиндрической.

Расчет эффективности использования распыляемого материала

Для обоснования выбора концепции обращенного магнетрона – восьмигранной призмы как оптимального - для данной конструкции был проведен расчет эффективности использования распыляемого материала с учетом оптимальной загрузки проволоки и её многопроходности. Расчет эффективности использования распыляемого материала осуществлялся на примере серебра с использованием программы SIMTRA. Возможность проведения расчетов с использованием этой программы применительно к конструкции обращенного магнетрона и условиям настоящего исследования была продемонстрирована в работах [14,15]. Внешний вид моделируемой области представлен на рис. 7.

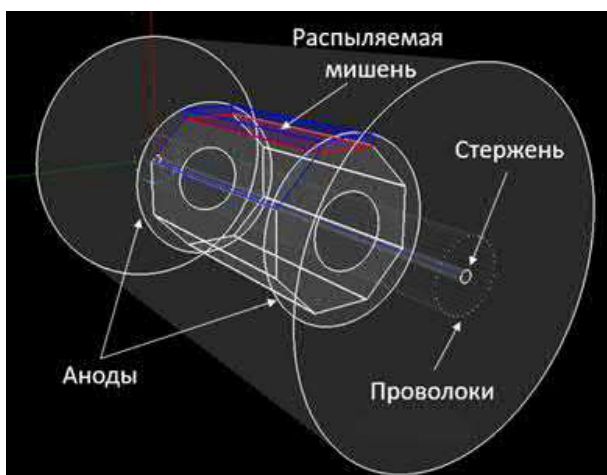


Рис. 7. Расчет при помощи программы SIMTRA

Расчет осуществляется при распылении одной из граней инвертированного магнетрона (интерфейс программы позволяет задавать только одну распыляемую поверхность). Этого достаточно для понимания процесса распыления, поскольку сам магнетрон и расположение проволок осесимметрично.

Интерфейс программы позволяет задавать зону эрозии мишени. В качестве распыляемой поверхности задавалась зона эрозии, коэффициент использования материала для которой составил приблизительно 70 %.

Предварительно производится расчет углового распределения распыленных атомов и распределение распыленных атомов по энергии (рис. 8, 9).

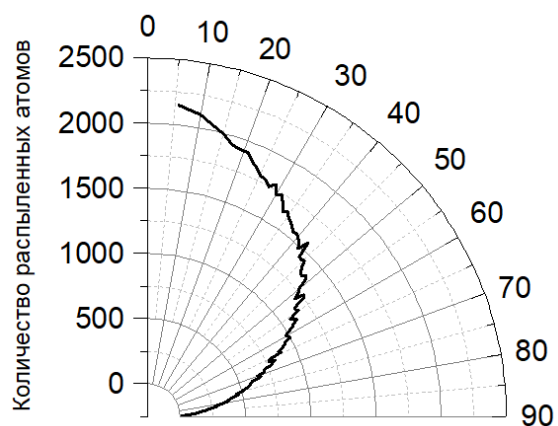


Рис. 8. Угловое распределение распыленных атомов Ag (100 000 ат.) при бомбардировке ионами аргона с энергией 450 эВ.

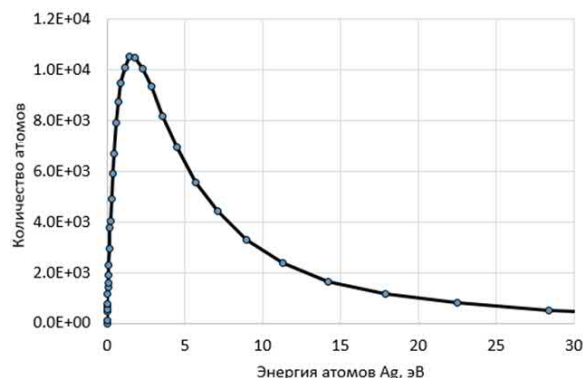


Рис. 9. Распределение распыленных атомов по энергии

Материалам с большим коэффициентом распыления соответствуют наиболее узкие угловые распределения. Серебро обладает одним из наиболее высоких коэффициентов распыления и низкой энергией сублимации. Чем выше энергия сублимации, тем выше барьер, который нужно преодолеть для распыления атома. Данные значения согласуются с результатами, полученными в работе [16].

В результате моделирования процесса распыления для конструкции обращенного магнетрона – восьмигранной призмы, размеры которой, а также загрузка проволокой с учетом её многопроходности являются оптимальными, было установлено, что на проволоку осаждается ~13,76% распыленного материала. Однако благодаря замкнутой конструкции магнетрона на мишени осаждается ~68% распыленного материала. У мишени есть “мертвые” зоны, которые предназначены для ее крепления. Материал, который осаждается на эти области мишени, больше не будет участвовать в процессе распыления, поэтому нужно учитывать только область распыления. Результаты расчетов для разработанной конструкции обращенного магнетрона показали, что за один процесс напыления теряется порядка 39,68% распыленного материала. На проволоку осаждается 13,76% распыленного материала. Тогда эффективность процесса распыления можно описать формулой:

$$\frac{\% \text{ проволока}}{\% \text{ потеря}} * 100\% = \frac{13,76 \%}{39,68 \%} * 100 \% \approx 34,68\% \quad (1)$$

Из безвозвратно потерянного материала (не осевшего в рабочую область мишени) на проволоку осаждается ~34,68 %. С учетом коэффициента использования мишени около 70% количество распыленного материала, осаждаемое на совокупность участков проволоки, с учетом её многопроходности в зоне распыления, составляет около 24%.

Полученные результаты не учитывают возможность переработки израсходованных мишеней, а также материала, осевшего на стенках камеры. Такая переработка также позволит повысить эффективность процесса распыления. Что касается производительности установки магнетронного напыления, созданной на основе данной концепции, предполагается, что такая установка позволит получать не менее одного километра покрытых проволочных изделий с каждой катушки за один технологический цикл напыления.

Заключение

Проведенный анализ существующих концепций установок нанесения покрытий методом магнетронного распыления на проволочные изделия, а также соображения, касающиеся их возможного улучшения для решения задач настоящего исследования, позволили заложить основные принципы оптимальной концепции установки нанесения покрытий на проволочные изделия, а также пути их технической реализации.

Очевидно, что современная установка магнетронного распыления покрытий на проволочные изделия должна основываться на концепции обращенного магнетрона, позволяющего достичь наиболее эффективного использования распыляемого материала за счет реализации принципа перераспыления мишени. Исходя из тех же соображений, а также повышения производительности, в такой установке должен быть реализован принцип многопроходности, обеспечивающий максимально возможное размещение одновременно напыляющихся участков проволоки в зоне распыления.

Результаты расчета эффективности использования материала мишени для предложенной конструкции обращенного магнетрона – восьмигранной призмы - показывают, что такая конструкция позволяет добиться эффективности распыления от 20% до 25%. Такая эффективность использования распыляемого материала позволяет сделать процесс экономически целесообразным и с учетом сохранения основных преимуществ магнетронного распыления конкурентоспособным в сравнении с гальванической технологией.

Все заложенные принципы будут использованы при создании опытной установки магнетронного напыления защитных покрытий на микрокомпозиционную проволоку длиной не менее 1000 метров.

Список литературы

1. Shihua Xiang, Xiaofang Yang, Lu Wang. *Texture Evolution and Hardness in Cu-Nb Composite Wires / material (basel) 14 (18), 2021, p. 12.*
2. *Основные тенденции на рынке меди / Обор рынка металлов. – Медь (Cu). – Годовой отчет ПАО «ГМК «Норильский никель» за 2020 год. - [Электронный ресурс].*
3. Климов Е.С., Эврюкова М.Е., Колганова Н.С., Варламова С.И., Борисова В.В. *Экологические проблемы гальванических производств // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 11. – С. 68-69;*
4. Antoine Merlo, Gregoire Leonard. *Magnetron sputtering vs. Electrodeposition for Hard Chrome Coatings: comparison of environmental and economic performances / Materials (Basel), 14 (14), 2021, p. 20*

5. Stefano Martinuzzi, Lorenzo Donati. A Comparative Research on Corrosion Behavior of Electroplated and Magnetron Sputtered Chromium Coatings / *Coatings* 12 (2) 2022, p. 13.
6. С.М. Гусаров, П.Л. Жуковский, М.Ю. Корниенко, Н.Н. Краснобаев, А.О. Тимов. Применение метода магнетронного распыления для нанесения защитных покрытий на микрокомпозиционную проволоку / *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*, 2(128) 2025.
7. Гренадёр А. С., Семёнов В. А., Соловьев А. А., Работкин С. В. Патент RU 2 788 878 C1, 2023 г.
8. Аяши О.А., Лаптев А. Г., Аяши А. В. Патент RU 2 829 751C1, 2024 г.
9. Страумал Б.Б., Вершинин Н.Ф., Густ В. Нанесение покрытий на проволоку с помощью магнетронного распыления // *Материаловедение*, 1997, №2, с. 42-47.
10. А.А. Гончаров, А.В. Демчишин, А.А. Демчишин, Е.Г. Костин и др. Характеристики цилиндрического магнетрона и реактивное напыление в нем пленок бинарных соединений / *Журнал технической физики*, том 77, вып. 8, 2007 г.
11. U. Vogel, C. Klaus, C. Nobis, J.W. Bartha Analysis of the energy input during wire coating from a cylindrical magnetron source // *Thin Solid Films* 520 (2012) 6404-6408. doi:10.1016/j.tsf.2012.05.072
12. Зиньковский К.А., Желонкин Я.О., Вознесенский Э.Ф., Кашапов Н.З. Разработка магнетронного диода инвертированного типа для осаждения защитных покрытий на проволоочные изделия // *Газо-разрядная плазма и синтез наноструктур: материалы V Международной конференции (20-24 ноября 2024 г., Казань)* / отв. ред. Б.А. Тимеркаев. Казань: Бук, 2024. С. 31-34.
13. Зиньковский К.А., Желонкин Я.О., Вознесенский Э.Ф., Кашапов Н.З. Использование метода магнетронного распыления для осаждения защитных покрытий на проволоочные изделия // *Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий: материалы III Всероссийской конференции (27-28 марта 2025 г., Казань)* / отв. ред. М.М. Гребенщикова. Казань: Издательство Казанского национального технологического университета, 2025. С. 431-433.
14. Depla D., Leroy W. P. Magnetron sputter deposition as visualized by Monte Carlo modeling // *Thin Solid Films*. – 2012. – Т. 520. – №. 20. – С. 6337-6354.
15. Van Aeken K., Mahieu S., Depla D. The metal flux from a rotating cylindrical magnetron: a Monte Carlo simulation // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2008. – Т. 41. – №. 20. – С. 205307.
16. Мартыненко Ю. В., Рогов А. В., Шульга В. И. Угловое распределение атомов при магнетронном распылении поликристаллических мишеней // *Журн. технической физики*. – 2012. – Т. 82. – №. 4. – С. 13-18.

Поступила в редакцию / Received 12.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 15.12.2025

Принята к публикации / Accepted 15.12.2025