

УДК 621.793.182

АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ МАГНЕТРОНОВ НМСА-52 И МАК 2” И ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПЛАВЛЕНИЯ МИШЕНЕЙ

Мария Владимировна Макарова⁽¹⁾, Денис Дмитриевич Васильев⁽²⁾

Студент 4 курса⁽¹⁾, аспирант 1 года⁽²⁾,

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Одним из способов нанесения покрытий является метод ионного распыления в магнетронных системах с жидкой мишенью. Этот метод отличается высокой скоростью осаждения, которая на порядок выше, чем у магнетронов с твердой мишенью, высокой энергетической эффективностью, а также высокими показателями чистоты и адгезии [1].

В отличие от обычного магнетрона, в жидкофазном магнетроне в качестве мишени используется металл в тигле, изолированный от системы охлаждения и нагреваемый до температуры плавления под воздействием ионов плазмы. Скорость осаждения в данном случае складывается из двух факторов: испарения и распыления. При высоких температурах процесс испарения становится доминирующим. Энергию, идущую на нагрев мишени, не нужно отводить из катодного узла системой охлаждения, что позволяет значительно увеличить мощность, вкладываемую в разряд.

Для реализации данного метода нанесения на вакуумной установке МВТУ-11-1 в лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ОАО «НИИТМ» разработан и изготовлен жидкофазный магнетрон НМСА-52.

Однако, при реализации данного метода возникли проблемы с достижением магнетроном жидкофазного режима. Для выхода на жидкофазный режим крайне важна величина ионного тока, от которой зависит мощность, вкладываемая в разряд [1]. От величины передаваемой мощности напрямую зависит скорость перехода мишени в жидкую фазу. Встает вопрос о поиске магнитной системы, которая обеспечивала бы большую степень ионизации. Цель данной работы – анализ различных магнитных систем двух магнетронов: НМСА-52, который разрабатывался как жидкофазный, и МАК 2”, который разрабатывался как обычный магнетрон, с последующим выявлением наиболее эффективной магнитной системы, обеспечивающей лучшие показатели ВАХ при работе, как с жидким, так и с твердым катодом.

1. Сравнение остаточной магнитной индукции, обеспечивающейся магнитными системами

Для определения величины остаточной магнитной индукции магнитного поля, обеспечивающейся системами, было проведено его измерение с помощью портативного универсального микротесламетра ТП2-2У-03. Перед измерением была проведена калибровка нуля, колебание фонового поля было незначительно – в пределах ~0,8 мТл. При измерении был выбран зонд "М" с рабочей поверхностью плоской формы. При измерении зонд устанавливался перпендикулярно относительно плоскости измерения, как это показано на рисунке 1, а. Схема измерения поля для магнетронов НМСА-52 и МАК2”отличаются, поскольку различны конфигурации их магнитных систем. Схемы представлены на рисунке 1, б, в.

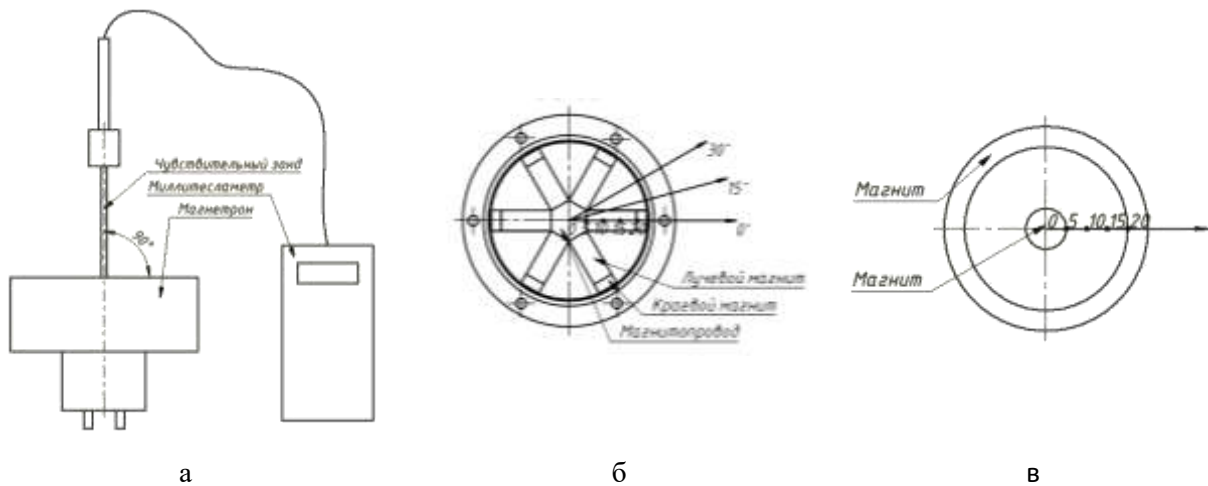


Рис. 1. Иллюстрация проведения измерений: а – общая схема измерения; б – для магнетрона НМСА-52; в – для магнетрона МАК 2''

При такой схеме измерения микротесламетр измеряет тангенциальную составляющую магнитной индукции магнитного поля. Для каждого из положений выполнены измерения на поверхности катода ($h=0$ мм), со стандартной медной мишенью ($h=3,2$ мм), с молибденовым тиглем и медной мишенью ($h=3,9$ мм). Измеренные значения приведены в таблице 1. Графики сравнения для минимальной и максимальной высоты приведены на рисунке 2.

Таблица 1 – Значения магнитной индукции магнетронов НМСА-52 и МАК 2''

Расстояние от центра, мм			0	5	10	15	20
Параметры эксперимента			Значения магнитной индукции, мТл				
Магнетрон	Высота, мм	Угол, °					
НМСА-52	0	0	15,4	88,2	135,9	122,8	62,1
		15	20,1	73,0	128,7	120,0	74,5
		30	10,4	78,2	147,7	114,5	57,4
	3,2	0	14,0	62,0	83,0	82,0	45,0
		15	14,5	50,0	78,5	73,7	45,6
		30	9,0	45,0	80,0	75,0	46,0
	3,9	0	13,6	88,7	113,4	87,4	45,2
		15	3,8	86,2	113,0	100,7	56,0
		30	5,4	89,1	112,5	97,9	50,0
МАК 2''	0	0	21,1	93,0	104,6	106,5	93,0
	3,2	0	2,9	56,0	73,0	70,3	47,6
	3,9	0	7,7	43,1	60,5	60,7	37,4

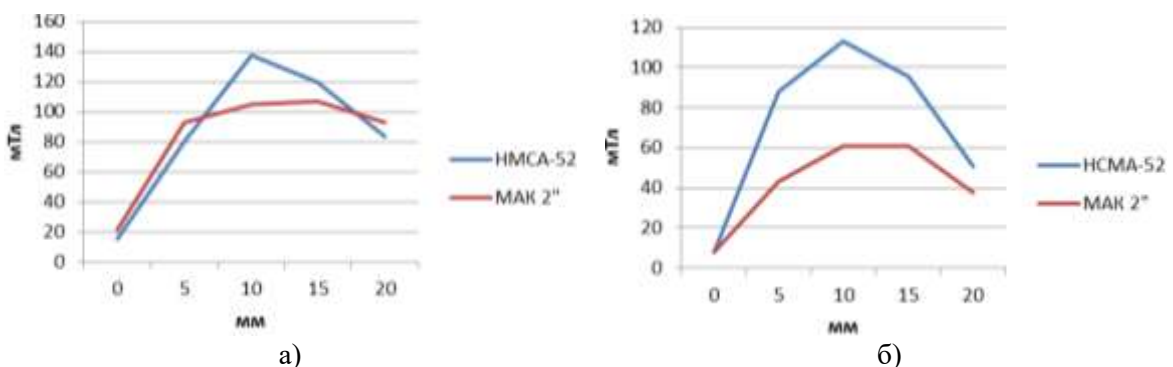


Рис.2. Графики измеренных значений магнитной индукции: а) – на нулевой высоте, б) – на высоте 3,9

В среде FEMM сделаны модели магнитных систем, представленные на рисунке 3. Графики сравнения представлены на рисунке 4.

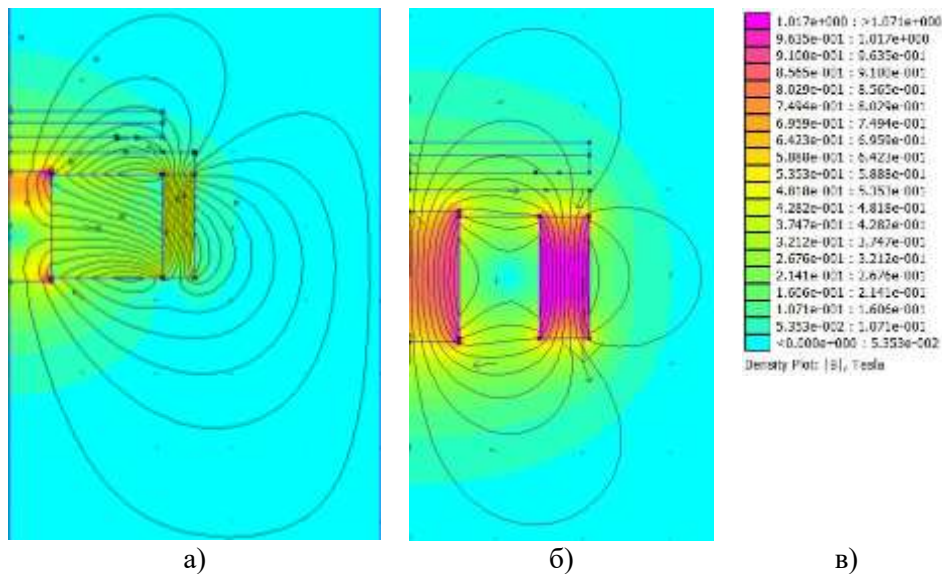


Рис.3. Осесимметричные модели магнитных систем: а) – система НМСА-52; б) – система МАК2”; в) – цветовая шкала распределения магнитной индукции

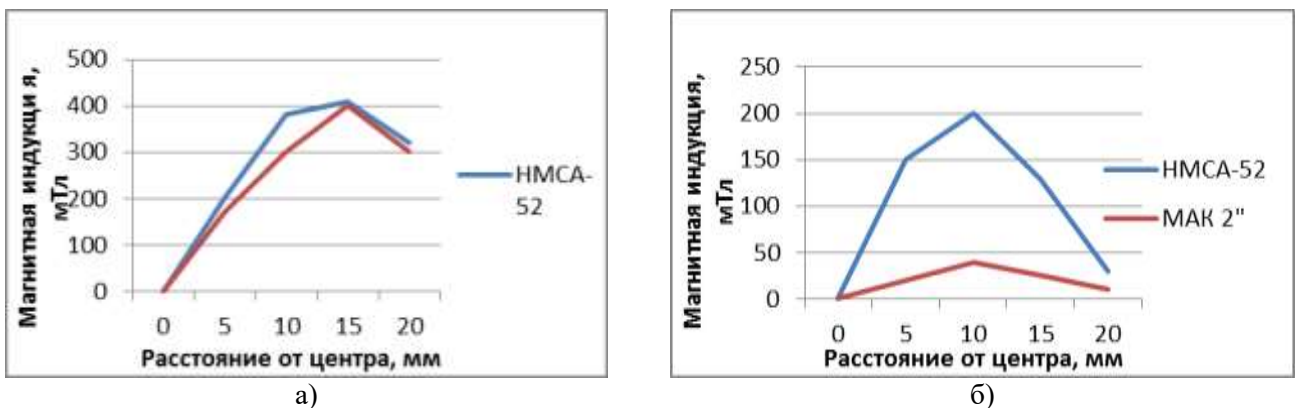


Рис. 4. Графики сравнения магнитной индукции моделей: а) – на высоте 0 мм; б) – на высоте 3,9 мм

Как видно из измерений лучевая магнитная система обеспечивает большую остаточную магнитную индукцию, чем кольцевая, что при работе магнетрона должно привести к большей степени ионизации, как следствие к более большим значениям ионного тока и мощности, вкладываемой в разряд. Это же подтверждает моделирование. То есть, исходя из этого, при работе с обычным магнетроном с лучевой магнитной системой необходимо меньшее напряжение, подаваемо с блока питания, для достижения тех же показателей. Для магнетрона с жидким катодом большая степень ионизации является залогом выхода на жидкофазный режим.

2. Проведение экспериментов по запуску магнетронов. Экспериментальный анализ систем

2.1 Запуск магнетронов с охлаждаемой Мо мишенью

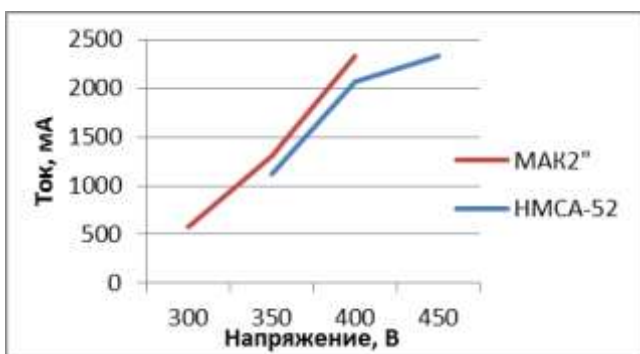
На магнетроны установлен молибденовый тигель в качестве мишени. Измерения представлены в таблице 2 и 3. На рисунке 5 представлены ВАХ. Блок питания рассчитан на 2300 мА, 1500 Вт. Регулировка велась по опорному напряжению.

Таблица 2 – Измерение параметров магнетрона МАК 2''

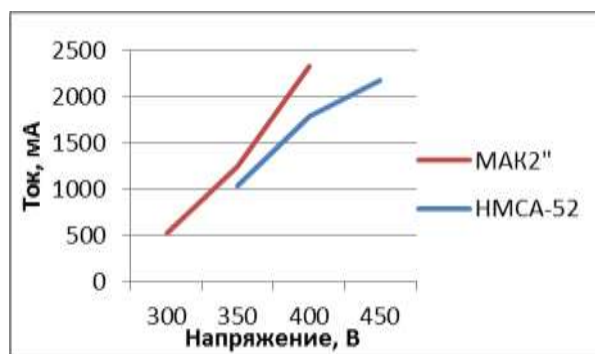
Давление, Па	0,5		0,39		0,2	
Напряжение, В	I, mA	P, Вт	I, mA	P, Вт	I, mA	P, Вт
300	573	172	527	158	482	144
350	1309	458	1243	435	1254	439
400	2335	946	2331	949	2338	947

Таблица 3 – Измерение параметров магнетрона НМСА-52

Давление, Па	0,55		0,4		0,2	
Напряжение, В	I, mA	P,Вт	I, mA	P,Вт	I, mA	P,Вт
350	1118	391	1031	360	77	27
400	2068	827	1790	716	1524	609
450	2335	1057	2171	876	1794	807
500			2329	1164	1876	938
550					2021	1111
600					2038	1222



а)



б)

Рис. 5. ВАХ магнетронов НМСА-52 и МАК2'': а) – при давлении 0, 5 Па, б) – при давлении 0, 4 Па

2.2 Запуск магнетронов с неохлаждаемыми Си мишенями, помещенными в Мо тигель

Для запуска с неохлаждаемыми мишенями магнетроны были установлены на установке МВТУ11-1 в полной конфигурации: молибденовый тигель, с погруженной в него медной мишенью контактирует с поверхностью магнетрона через специальные конические винты. Измененная конфигурация магнетрона МАК 2'' представлена на рисунке 6.



Рис. 6. Магнетрон МАК 2'' с измененной конфигурации для запуска с неохлаждаемой мишенью

Таблица 4 – Описание запуска МАК 2” с неохлаждаемой мишенью

№	P, Па	P, Вт	U, В	I, mA	Результат
1	0,6	300	500	596	Магнетрон легко зажегся, без помощи И.И. В начале немного искрил по контуру тигля. В течении 4 сек. стабилизировался. Показатели термодпары 25 ⁰ С, что не опасно для магнитов. Решено увеличить мощность.
2		500	538	925	Стабильно горит. За 30 сек. практически вся медь начала кипеть и бурлить. Появилось дно. Показатели термодпары стали достаточно высокими – 60 ⁰ С, риск достижения критической температуры размагничивания магнитов. Процесс остановлен. Мишень расплавилась. Рисунок 7.



Рис. 7. Расплавленная мишень на МАК2”

Таблица 5 – Параметры запуска магнетрона НМСА-52 с неохлаждаемой мишенью

Давление, Па	0,78	
Напряжение, В	I, mA	P, Вт
300	75	22
350	101	36
400	150	61
450	225	100
500	280	138
550	332	173
600	340	200
650	311	198
700	283	200
750	291	218
800	288	226

Как показали эксперименты по запуску магнетрона МАК2” в жидкофазном режиме, для того, чтобы мишень начала плавиться, необходимы мощности, превышающие 300 Вт. Как видно из полученных измерений, при полной конфигурации НМСА-52 с молибденовым тиглем, контактирующим с поверхностью через конические винты, изготовленные из нержавеющей стали, такого значения достичь не удалось. Полученные мощности недостаточны для плавления мишени, то есть выхода магнетрона на режим.

Результаты

Несмотря на превосходство величины остаточной магнитной индукции лучевой системы магнитов, принадлежащей магнетрону НМСА-52 над кольцевой магнитной системой магнетрона МАК 2” эксперименты показали, что для работы с охлаждаемыми мишенями, т.е. для работы магнетронов с твердым катодом, годятся обе магнитные системы. Однако, для работы с магнетроном с жидкой мишенью, явное превосходство демонстрирует кольцевая магнитная система.

Величина ионного тока зависит от величины магнитного поля [2], а именно, чем больше магнитное поле, тем больше должна быть величина ионного тока. Из-за различия конструкции

магнитных систем у имеющихся магнетронов, они имеют различную конфигурацию магнитного поля. Вероятно, поэтому предсказать, у какого магнетрона будет выше ВАХ, исходя только из величины магнитной индукции, нельзя.

Вблизи магнетронов, исходя из экспериментов, видно, что величина ионного тока достигает одинаковых значений, но в силу различия местоположения экстремумов силовых линий, при разных напряжениях. Также, видимо, конфигурация магнитного поля НМСА-52 не годится для плавления толстых мишеней. Как видно из модели (рис. 3), магнитное поле НМСА-52 падает с высотой быстрее МАК2”, как следствие это может быть связано с тем, что величины ионного тока, возникающего у НМСА-52, недостаточно для плавления мишени. На краях модели НМСА-52 на уровне мишени поля можно видеть голубой цвет, в то время как у МАК2” в том же месте еще несколько миллиметров желтого цвета.

Литература

1. Магнетронные распылительные системы / *А. И. Кузьмичёв* — М.: Из-во «Аверс», 2008;
2. Исследование и оптимизация характеристик ионного источника URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/230165.html>