

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОКСИДНО-НИКЕЛЕВЫХ КАТОДОВ СВЧ-ПРИБОРОВ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Н.Е. Леденцова¹, ведущий инженер-технолог, И.П. Ли¹, заместитель директора по технической политике, В.С. Петров¹, инженер-технолог, В.И. Капустин^{2,@}, профессор

¹ОАО «Плутон», Москва, 105120 Россия

²Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия

@Автор для переписки, e-mail: kapustin@mirea.ru

Проведен анализ физико-химических процессов, протекающих в оксидно-никелевых катодных материалах, на основе которого разработаны три технологии изготовления таких катодов для электровакуумных СВЧ-приборов сантиметрового диапазона длин волн. Первая технология основана на классических методах порошковой металлургии, вторая предусматривает предварительное формирование агломератов на основе порошка никеля и тройных карбонатов бария-кальция-стронция, третья – формирование агломератов и их отжиг в среде углекислого газа для предотвращения образования гидроксидов бария-кальция-стронция, ухудшающих эмиссионные свойства катода.

Ключевые слова: термоэлектронная эмиссия, оксидные катоды, оксидно-никелевые катоды, технологии катодных материалов, порошковые технологии, катоды СВЧ-приборов.

PERSPECTIVE NICKEL-OXIDE CATHODES TECHNOLOGIES FOR CENTIMETRIC RANGE MICROWAVE DEVICES

N.E. Ledentsova¹, I.P. Li¹, V.S. Petrov¹, V.I. Kapustin^{2,@}

¹JSC "Pluton", Moscow, 105120 Russia

²Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia

@Corresponding author e-mail: kapustin@mirea.ru

Three technologies of nickel-oxide cathodes based on nickel powder and on barium-calcium-strontium triple carbonate powder for microwave ovens of the centimetric wave length range devices are suggested. The optimum fraction of nickel powder for the production of cathodes is 45–71 microns. The optimum content of the triple carbonate is 10%. The optimum pressure of pressing is 7 t/cm². The optimum temperature of agglomeration is 1100°C for 10 min. The quality improvement and yield of suitable cathodes are provided by the use of agglomerates of nickel and triple carbonates. The agglomerates contain nickel particles of the 10–25 microns fraction coated with the triple carbonate containing 50% of the carbonate and baked in dried hydrogen at 1000°C for 10 min. The formation of the cathode is carried out by mixing and agglomerating the 45–63 microns fraction and the nickel 45–71 microns fraction with the carbonates concentration 10%. In order to improve the cathodes quality it is expedient to anneal the agglomerates after their production in carbon dioxide at 200–300°C with a final purge by nitrogen at 1000°C for 10 minutes. The use of agglomerates based on nickel and the triple carbonate for the production of oxide-nickel cathodes provides more uniform distribution of the emission-active agent in the volume and on the surface of the cathodes.

Keywords: thermionic issue, oxide cathodes, oxide-nickel cathodes, technologies of cathode materials, powder technologies, microwave ovens cathodes of devices.

Введение

Оксидные катоды, наиболее дешевые и экономичные, работающие при относительно низких температурах (600–950°C для разных типов катодов), до сих пор эффективно применяются в клистронах и ЛБВ при импульсном токоотборе до 5 А/см² и долговечности до 10 тыс. ч, а также в ЛБВ для аппаратуры спутниковой связи при токоотборе до 0.15 А/см² и долговечности до 100 тыс. ч [1–3]. Одной из разновидностей оксидных катодов являются оксидно-никелевые катоды, которые получают либо на основе прессованных композиций «никель – смесь карбонатов бария-кальция-стронция», либо путем плазменного напыления указанных композиций на керн катода [4]. Они применяются в приборах магнетронного типа, где имеет место заметная электронная бомбардировка поверхности катода. Оксидно-никелевые катоды нашли также применение в инжекторах волноводных ускорителей при токоотборе в непрерывном режиме до 2 А/см² и импульсном токоотборе до 50 А/см² [5].

Традиционно считается, что диспергированное введение никеля в карбонатную фазу повышает теплопроводность материала катода и снижает его электросопротивление, предотвращая разогрев оксидного слоя и его отслоение, а также искрение катода [4, 5]. Однако исследования, проведенные нами с использованием методов оптической и электронной спектроскопии, показали [6, 7], что диспергирование никеля в объеме оксидной фазы катода сопровождается:

1) изменениями в электронной структуре оксида бария, который является основным эмиссионным компонентом оксидно-никелевого катода;

2) проявлением каталитического воздействия никеля на фазовые превращения в катодных материалах.

Настоящая работа базируется на ранее полученных результатах [6, 7] и имеет целью разработку новых технологий оксидно-никелевых катодов для электровакуумных СВЧ-приборов сантиметрового диапазона длин волн.

Физико-химические основы технологий

Ранее [8, 9] удалось рассчитать зависимости работы выхода оксида бария от температуры и концентрации кислородных вакансий. Совместный анализ этих, а также приведенных в работах [6, 7] данных позволил сделать вывод, что эмиссионные свойства оксидного катода на никелевом керне, легированном различными дополнительными элементами, определяются двумя факторами:

1) значением оптимальной концентрации кислородных вакансий, которая достигается при использовании различных вариантов ядра в различные ин-

тервалы времени;

2) влиянием никеля на электронную структуру оксида бария, прежде всего, на структуру края валентной зоны, которая во многом влияет на величину работы выхода оксида бария.

Изложенные выше обобщения о роли никеля в оксидно-никелевых катодных материалах позволяют сформулировать физические и физико-химические основы разработки технологий оксидно-никелевых катодных материалов. В первую очередь, технологии должны обеспечить равномерное легирование кристаллитов оксида бария атомами никеля во всем объеме оксидной фазы катодного материала, что будет способствовать повышению однородности эмиссионных свойств катодов и воспроизводимости технологий их изготовления. Кроме того, технологии должны обеспечить равномерное по объему оксидной фазы катодного материала каталитическое воздействие никеля на оксидную фазу, обеспечивая равномерность разложения тройного карбоната бария-кальция-стронция до оксидной фазы и предотвращая образование соответствующих гидроксидов.

При выборе технологических схем изготовления прессованных оксидно-никелевых катодов необходимо учесть следующие требования:

- процесс изготовления катодов должен быть высокоэффективным, надежным и экономически выгодным при производстве магнетронов в условиях серийного выпуска;

- процесс изготовления катодов должен быть высокотехнологичным и управляемым;

- разработанные катоды должны обеспечивать высокую стабильность и воспроизводимость эксплуатационных параметров магнетронов сантиметрового диапазона длин волн.

Для исследований нами выбраны следующие варианты технологий изготовления оксидно-никелевых катодов для СВЧ-приборов:

вариант А – механическая смесь карбонильного никеля (фракционных составов 5–7 мкм, 10–25 мкм, 45–71 мкм и 71–100 мкм) и тройного карбоната бария-стронция-кальция марки КТА-1-6 при его содержании, изменяемом в интервале 2.5–15% мас;

вариант Б – механическая смесь карбонильного никеля (основы с фракционным составом 45–71 мкм) и синтезированного агломерата (никель фракции 5–7 мкм или 10–25 мкм + тройной карбонат бария-кальция-стронция марки КТА-1-6 с содержанием карбоната 30 или 50% мас.);

вариант В – механическая смесь карбонильного никеля (основы с фракционным составом 45–71 мкм) и восстановленного в токе СО₂ агломерата (никель фракции 5–7 мкм или 10–25 мкм + тройной карбонат бария-кальция-стронция марки КТА-1-6 с содержанием карбоната 30 или 50% мас.).

Варианты А технологий изготовления катодов

Предварительные исследования микроструктуры катодных материалов показали, что наибольшая однородность смесей достигается при использовании порошка никеля фракций 5–7 мкм и 45–71 мкм. Порошки никеля подвергали промывке, отжигу и просеиванию. Тройной карбонат бария-кальция-стронция прокаливали и просеивали. Далее порошки никеля и тройного карбоната смешивали в установке планетарного типа «Турбула» в течение 3 и более час. После этого брали навески, производили прессование на лабораторном прессе в специальной техно-

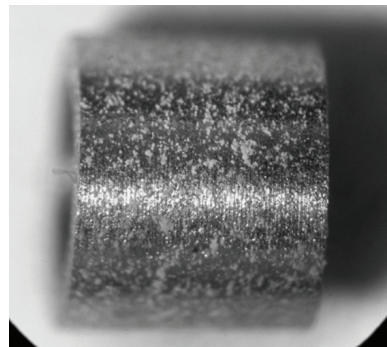
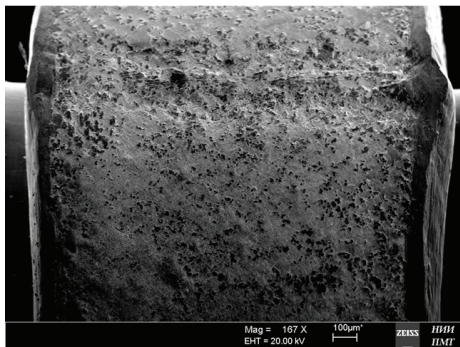


Рис. 1. Внешний вид катодов: а – традиционный губчатый оксидный катод; б – прессованный катод на основе никеля и тройных оксидов (Ba, Ca, Sr).

На этапе оптимизации фракционного состава никелевого порошка были изготовлены пресс-порошки, состоящие из никеля фракции 45–71 мкм и тройного карбоната (Ba, Ca, Sr) марки КТА-1-6 с содержанием последнего 2.5; 5.0; 7.5 и 10% мас., и спрессованы цилиндрические образцы катодов диаметром $d = 6.85$ мм и высотой $h = 2.47 \dots 2.55$ мм при пяти значениях удельного усилия прессования. После спекания заготовок в среде осушенного водорода при температуре 1100°C и расчета пористости по формуле

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{\text{загот}}}{\rho_{\text{компл}}} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

где $\rho_{\text{компл}}$ – плотность никеля, равная 8.9 г/см^3 ;

$\rho_{\text{загот}}$ – плотность заготовки катода, рассчитываемая как m/V ;

m – масса, V – объем заготовки,

получили зависимости пористости от удельного усилия прессования при различных концентрациях тройного карбоната, представленные на рис. 2. С увеличением содержания тройного карбоната в пресс-порошках пористость катодов возрастает. Однако при токарной обработке таких катодов образцы начинают крошиться.

В отличие от крупнофракционного никеля в эмиттерах с никелевым порошком фракции 5–7 мкм произошло «распухание» геометрических размеров

логической оснастке. Образцы прессованных катодов спекали в среде осушенного водорода с точкой росы не выше -60°C . Далее заготовки подвергали токарной обработке до заданных конструкционных размеров, химическому обезжириванию и очистительному отжигу в вакууме, сборке в составе катодно-подогревательных узлов. На рис. 1 приведены внешний вид традиционного оксидного катода после финальной операции обжимки в 3-секционной оснастке и прессованного оксидно-никелевого катода. Отметим, что финишная опрессовка традиционного оксидного катода приводит к деформации экранов.

после спекания, что связано с наличием в исходных порошках частиц других размеров, а также с морфологией порошков, обусловленной, например, их комкованием.

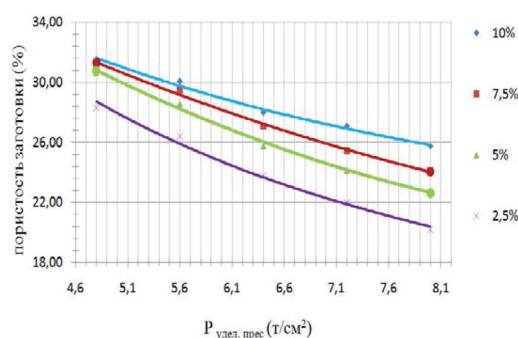


Рис. 2. Зависимость пористости оксидно-никелевых заготовок катодов от удельного усилия прессования.

Еще одной причиной уменьшения плотности заготовок после спекания являются замкнутые поры, образующиеся в процессе спекания, поскольку в них создается повышенное давление газа вследствие выделения сорбированных газов. Этот факт может быть связан с высокой сорбционной способностью мелкодисперсного карбонильного никеля, смешанного с тройным карбонатом (Ba, Ca, Sr).

В результате проведенных исследований установлено, что процесс спекания заготовок катодов на основе тройных оксидов следует проводить в атмосфере осушенного водорода при температуре 1100°C в

течение 10 мин. Очистительный отжиг целесообразно вести в вакууме, однако при более низких температурах (600–700°C), с предварительной протиркой эмиттеров петролейным эфиром. Очистительный отжиг эмиттеров без обезжиривания категорически нежелателен ввиду сохранения на них механических примесей.

Структура поверхности катодов на основе оксидно-никелевых катодных материалов после токарной обработки несет на себе следы резца. Последующий очистительный отжиг катодов в атмосфере водорода немного сглаживает структуру, однако на поверхности выступает большое количество островков эмиссионно-активного вещества. При очистительном отжиге в вакууме количество образующихся островков существенно уменьшается.

После спекания заготовок катодов их пористость может изменяться. Влияние данного фактора на пористость катодов исследовано для двух составов катодных материалов, содержащих 10% тройного карбоната и никелевый порошок фракций 5–7 мкм и 45–71 мкм. Образцы прессовали при усилиях прессования $P = 60$ атм и спекали в атмосфере осушенного водорода при температурах 1000; 1050; 1100; 1150 и 1200°C в течение 10 мин. После этого проводили токарную обработку всех образцов для удобства расчета пористости, так как образцы с никелем фракции 5–7 мкм изменили свою форму в отличие от образцов, выполненных из никеля с фракционным составом 45–71 мкм. Зависимость пористости от температуры спекания образцов с разными фракциями никеля представлена на рис. 3.

Аналогичные эксперименты выполняли с образцами, содержащими другие количества эмиссионно-активного вещества. Установлено оптимальное усилие прессования заготовок, составляющее величину ~ 7 т/см², и определено количественное соотношение компонентов никель:тройной карбонат. Содержание последнего в смеси может варьироваться от 7.5 до 10% мас. в зависимости от условий работы

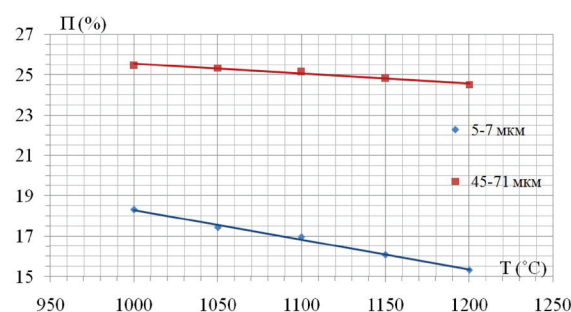


Рис. 3. Зависимость пористости заготовок оксидно-никелевых катодных материалов от температуры спекания в атмосфере осушенного водорода.

катода. Пористость при найденных экспериментальных условиях составляла 25...28% для никеля фракции 45–71 мкм и 15...19% для никеля фракции 5–7 мкм. Приборы с такими катодами характеризуются устойчивой и бесперебойной работой во время динамических испытаний.

При концентрации карбоната от 10% мас. и выше отмечено значительное снижение механической прочности, которое может приводить к возникновению искрений, ухудшению спектра и уменьшению мощности генерируемых колебаний в процессе тренировки прибора.

Варианты Б технологий изготовления катодов. В данных вариантах технологий для исследований выбран материал на основе механической смеси никеля (фракция 45–71 мкм) и агломерата (Ni фракции 10–25 мкм + 30 или 50% мас. карбоната марки КТА-1-6). Порошки для изготовления агломератов смешивали в установке планетарного типа и спекали насыпью в атмосфере осушенного водорода. После этого спекы растирали в агатовой ступке до фракции 45–63 мкм и смешивали с никелем (фракции 45–71 мкм) до концентрации эмиссионно-активного вещества в пресс-порошке, равной 10% мас. Режимы спекания агломератов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы спекания компонентов в атмосфере водорода для получения агломератов

№ образца	Состав	Температура, °C	Время, мин
1	Ni фракции 5–7 мкм + 30% мас. карбонатов КТА-1-6	1100	10
2	Ni фракции 5–7 мкм + 30% мас. карбонатов КТА-1-6	900	10
3	Ni фракции 5–7 мкм + 30% мас. карбонатов КТА-1-6	1100	30

Полученные спекы размалывали в агатовых ступках и исследовали в растровом электронном микроскопе EVO40 фирмы Zeiss, оснащенным SDD кремниевым дрейфовым детектором X Feash 1106. Спекы, полученные при температуре 1100°C, при растирке образовывали частицы пластинчатой формы, причем данный эффект

сильнее всего проявился в образцах, спекаемых в течение 30 мин при температуре 1100°C. Для образцов, полученных при 900°C, наблюдали наличие свободных частиц оксидной фазы. Результаты исследования микроструктуры образцов 1, 2 и 3 приведены на рис. 4.

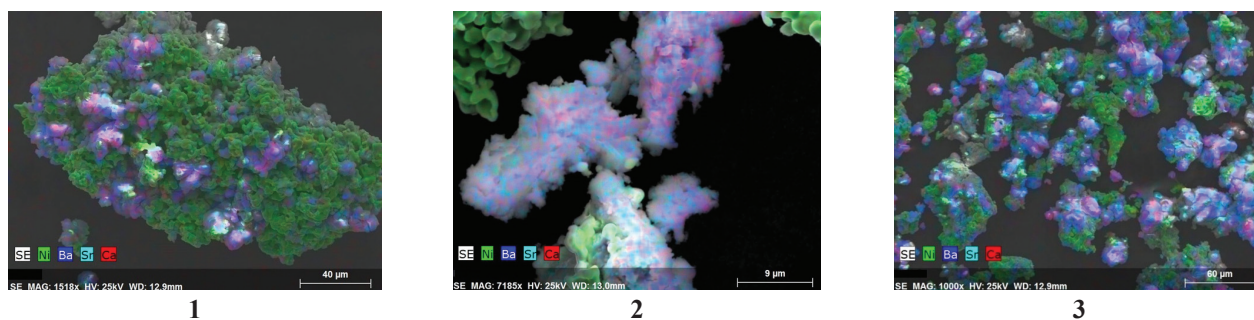


Рис. 4. Микроструктура агломератов 1, 2 и 3 при различных режимах спекания.

В результате проведенных исследований установлено, что оптимальной технологической схемой изготовления агломератов является:

- фракционный состав никелевого порошка 10–25 мкм;
- содержание эмиссионно-активного вещества в исходном порошке 50% мас.;
- синтез агломератов в атмосфере осушенного

водорода при температуре 1000°C;

- время выдержки при максимальной температуре 10 мин;
- растирка спёков в агатовой ступке до фракции 45–63 мкм.

Изображения, полученные в растровом электронном микроскопе, для исходных агломератов и агломератов после спекания, приведены на рис. 5.

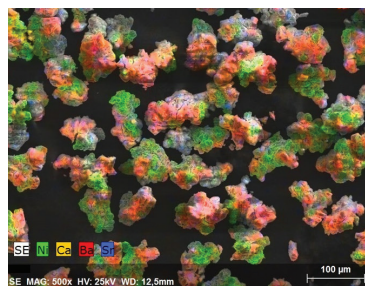
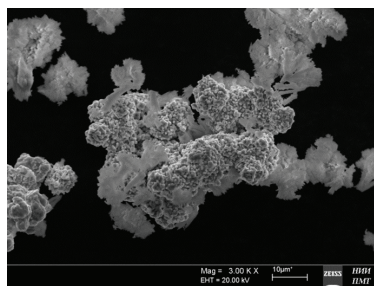


Рис. 5. Микроструктура агломератов до (слева) и после (справа) спекания.

На рис. 5 видно, что частицы свободного карбоната после спекания отсутствуют, а частицы никеля полностью «окутаны» эмиссионно-активным веществом.

Следующей стадией изготовления катодов является получение пресс-порошка. Для этого синтезированный агломерат растирали в агатовой ступке и просеивали через сита до фракции 45–63 мкм, а затем смешивали с карбонильным никелем фракции 45–71 мкм до содержания эмиссионно-активного вещества в пресс-порошке 10% мас. Перемешивание осуществляли в смесителе планетарного типа «Турбула» в течение 3 ч. Из полученного порошка прессовали эмиттеры, цилиндрическую поверхность которых исследовали в растровом электронном микроскопе. Результат показан на рис. 6.

Благодаря наличию агломератов в составе катодов на основе оксидно-никелевых катодных материалов, получено равномерное распределение эмиссионно-активного вещества в никелевой матрице катода. Магнитные свойства никеля при этом полностью сняты.

Варианты В технологий изготовления катодов

Здесь для исследований выбран материал на основе механической смеси никеля (фракции 45–71 мкм) и агломерата (Ni фракции 10–25 мкм + 50% мас. карбоната марки КТА–1–6), восстановленного в среде CO₂.

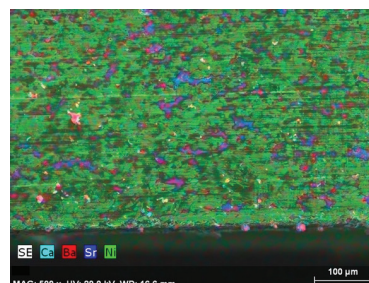


Рис. 6. Картирование цилиндрической поверхности оксидно-никелевого эмиттера, изготовленного с использованием агломератов.

Методом рентгенофазового анализа установлено, что после извлечения из водородной печи агломератов, изготовленных в соответствии с вариантом Б, а также в процессе размола агломератов и прессования катодов оксидные соединения, полученные во время спекания, переходят в гидроксиды и пероксиды, которые не восстанавливаются до оксида бария при активировании катодов. Поэтому мы исследовали влияние условий хранения порошков катодных материалов после их спекания на воздухе, в обезвоженной среде (эксикаторе), в углекислой атмосфере на их свойства.

Смеси карбонатов для получения агломератов на основе никеля, покрытого карбонатом, спекали

насыпью в среде водорода с заключительной продувкой азотом при температуре 1000°C в течение 10 мин. Далее полученный агломерат делили на три части, которые сразу же помещали в воздушную, обезвоженную и углекислую среды. В табл. 2 даны значения массы образцов материалов m и изменения массы Δm в результате их хранения в различных средах в течение

различного времени. Ниже на рис. 7 и 8 для сравнения представлены результаты исследования структуры агломератов в растровом электронном микроскопе.

На рис. 9 приведен состав поверхности катода, изготовленного с использованием порошка никеля фракции 10–25 мкм и агломератов никель/карбонаты, восстановленных в атмосфере CO₂.

Таблица 2. Массы образцов материалов (г) и изменение массы при хранении в различных средах

Воздух	Обезвоженная среда (эксикатор с силикагелем)	CO ₂
Исходная масса m		
11.0963	11.1189	11.1217
Через сутки		
11.1218 ($\Delta m = 0.23\%$)	11.1239 ($\Delta m = 0.04\%$)	11.1488 ($\Delta m = 0.24\%$)
Через 3 суток		
11.1271 ($\Delta m = 0.05\%$)	11.1246 ($\Delta m = 0.006\%$)	11.1691 ($\Delta m = 0.18\%$)
Суммарное Δm за 5 суток		
$\Delta m = 0.28\%$	$\Delta m = 0.05\%$	$\Delta m = 0.42\%$

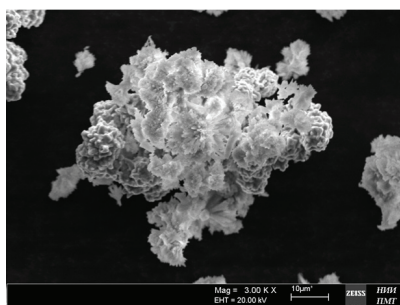


Рис. 7. Исходные карбонаты бария-кальция-стронция до спекания.

В результате анализа установлено, что тройной карбонат, разложившийся при спекании до тройных оксидов, вновь переходит в тройной карбонат при прокаливании его в течение 1–2 ч в токе нагретого до 180–200°C углекислого газа. При этом компактная форма полученных агломератов сохраняется.

Испытание катодов, изготовленных по разработанным технологиям

Конструкция катодно-подогревательных узлов (КПУ) с прессованными эмиттерами на основе оксидно-никелевых катодных материалов включает в себя kern, пористую губку с распределенным в ней эмиссионно-активным веществом той или иной пористости и состава. Для примера на рис. 10 приведен внешний вид катодно-подогревательных узлов различных малогабаритных магнетронов, в которых применяются оксидно-никелевые катодные материалы.

Технологический процесс изготовления прессованных оксидно-никелевых катодов является высокотехнологичным и управляемым, а его внедрение в серийное производство позволит, с одной стороны,

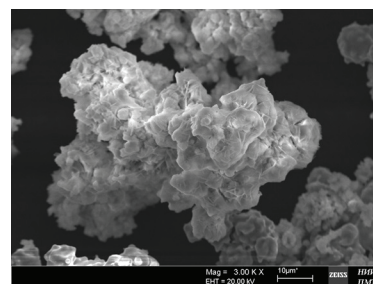


Рис. 8. Агломераты после спекания в водороде при 1000°C в течение 10 мин (с заключительной продувкой азотом) при хранении в обезвоженной среде.

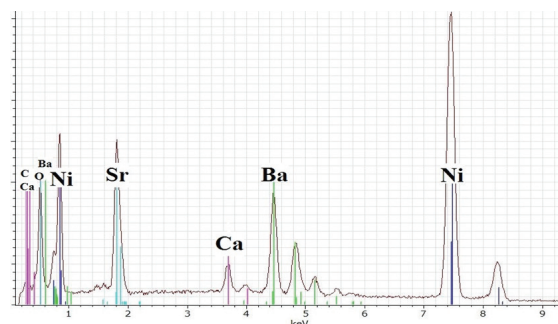


Рис. 9. Элементный состав агломератов никеля и тройного карбоната (Ba, Ca, Sr), восстановленных в токе CO₂, установленный с помощью растрового электронного микроскопа.

существенно повысить эффективность производства электровакуумных приборов (магнетронов, ЛБВ, клистронов и др.) и, с другой стороны, значительно повысить их надежность и срок службы. Операции изготовления прессованных катодов на основе оксидно-никелевых катодных материалов включают:



Рис. 10. Катодно-подогревательные узлы с эмиттерами на основе оксидно-никелевых катодных материалов: 1 – изделие типа М1; 2 – изделие типа М2; 3 – изделие типа М3.

- отжиг и просеивание тройного карбоната марки КТА-1-6;
- промывку, отжиг и просеивание порошков никеля карбонильного;
- изготовление пресс-порошка, состоящего из смеси порошков никеля и тройного карбоната;
- прессование и спекание заготовок катодов;
- токарную обработку заготовок катодов;
- обезжиривание и очистительный отжиг эмиттеров.

Результаты испытаний прессованных оксидно-никелевых катодов, изготовленных по варианту **А**, в приборах показали, что катоды, содержащие карбонильный никель фракции 45–71 мкм, обладают лучшими эмиссионными характеристиками и большей стабильностью по сравнению с катодами, содержащими никель фракции 5–7 мкм.

Испытания оксидно-никелевых катодов, изготовленных по варианту **Б** технологий, в приборах показали, что в некоторых приборах наблюдается дробление спектра и снижение мощностных характеристик приборов по сравнению с катодами, выполненными по обычной технологической схеме. Вероятно, это происходит по причине преобразования эмиссионно-активного вещества в гидроксиды и кристаллогидраты при выносе на воздух агломератов после их синтеза в атмосфере водорода. Проведена апробация магнетронов с прессованными оксидно-никелевыми эмиттерами, изготовленными по варианту **В** с использованием агломератов, восстановленных в атмосфере CO_2 (табл. 3).

Таблица 3. Результаты испытаний катодов, изготовленных с использованием агломератов, в магнетронах изделия типа М1

Номер магнетрона	Ток термоэмиссии в диодном режиме (mA)	Результаты динамических испытаний
1	189	Годная
2	205	Годная
3	171	Годная

Заключение

1. Свойства оксидно-никелевого катодного материала, изготовленного по традиционной технологии путем смешивания, прессования и спекания порошков никеля и тройного карбоната бария-кальция-стронция, существенным образом зависят от фракционного состава исходного порошка карбонильного никеля, содержания в нем тройного карбоната, усилия прессования, температуры, газовой среды и времени спекания, а также от газовой среды хранения катодов.

2. Оптимальным фракционным составом никелевого порошка при изготовлении оксидно-никелевых катодов по традиционной технологии является порошок фракции 45–71 мкм, оптимальное содержание тройного карбоната марки КТА-1-6 составляет 10% мас. Оптимальным удельным усилием является 7 т/см², оптимальная температура спекания – 1100°C в течение 10 мин, оптимальная среда спекания – осушенный водород. Очистительный отжиг следует проводить в вакууме при температуре 600–700°C с предварительной протиркой эмиттеров петролейным эфиром. Оптимальной средой хранения катодов после их изготовления по традиционной технологической схеме является осушенная среда.

3. Повышение качества и процента выхода годных оксидно-никелевых катодов возможно с использованием агломератов никеля и тройных карбонатов бария-кальция-стронция. Агломераты представляют собой частицы никеля фракции 10–25 мкм, покрытые тройным карбонатом с содержанием карбоната 50% мас. и спеченные в атмосфере осушенного водорода при температуре 1000°C в течение 10 мин. Формирование катодного материала целесообразно осуществлять путем смешивания и последующего спекания агломератов фракции 45–63 мкм и никеля фракции 45–71 мкм с концентрацией карбонатов 10% мас. Для повышения качества катодов агломераты после их изготовления целесообразно отжигать в среде углекислого газа при температуре 200–300°C.

4. Оксидно-никелевые катоды, изготовленные по оптимизированной традиционной технологической

схеме, позволяют успешно заменить традиционные оксидные катоды и обеспечивают при этом повышение коэффициента использования дорогостоящих материалов, повышение процента выхода годных приборов и их долговечности. Процесс изготовления оксидно-никелевых катодов характеризуется высокой технологичностью и снижением доли ручного труда.

Список литературы:

1. Дюбуа Б.Ч., Поливникова О.В. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2013. Вып. 4 (519). С. 187–190.
2. Дюбуа Б.Ч., Култашев О.К., Поливникова О.В. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-электроника. 2008. Вып. 4 (497). С. 3–22.
3. Дюбуа Б.Ч., Королев А.Н. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2011. Вып. 1 (509). С. 5–25.
4. Соколов А.М., Каргин А.Н., Морозов О.А. // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2011. Вып. 1 (508). С. 64–69.
5. Алексеев Ю.В., Каничева И.Р., Кораблев В.В., Павлов В.К., Попов А.Н., Прудников И.А. // Препринт. М.: ЦНИИатоминформ. 1987. 16 с.
6. Ли И.П., Петров В.С., Прокофьева Т.В., Леденцова Н.Е., Шуманов А.В., Силаев А.Д., Поляков В.С., Капустин В.И., Свитов В.И. // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2015. Вып. 2 (525). С. 45–58.
7. Капустин В.И., Ли И.П., Петров В.С., Леденцова Н.Е., Турбина А.В. // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2016. Вып. 1 (528). С. 8–18.
8. Капустин В.И. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55. № 12. С. 2455–2458.
9. Капустин В.И. // Перспективные материалы. 2000. № 2. С. 5–17.

5. Применение агломератов на основе никеля и тройного карбоната при изготовлении оксидно-никелевых катодов обеспечивает более равномерное распределение эмиссионно-активного вещества в объеме и на поверхности катодов, однако данная технология требует проведения восстановительного отжига катодных материалов в среде углекислого газа.

References:

1. Dyubua B.Ch., Polivnikova O.V. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCH-tekhnik. 2013. Iss. 4(519). P. 187–190.
2. Dyubua B.Ch., Kultashev O.K., Polivnikova O.V. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCH-elektronika. 2008. Iss. 4 (497). P. 3–22.
3. Dyubua B.Ch., Korolev A.N. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCH-tekhnik. 2011. Iss. 1(509). P. 5–25.
4. Sokolov A.M., Kargin A.N., Morozov O.A. // Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCH-tekhnik. 2011. Iss. 1 (508). P. 64–69.
5. Alekseev YU.V., Kanicheva I.R., Korablev V.V., Pavlov V.K., Popov A.N., Prudnikov I.A. // Preprint. M.: CNIIatominform. 1987. 16 p.
6. Li I.P., Petrov V.S., Prokof'eva T.V., Ledencova N.E., Shumanov A.V., Silaev A.D., Polyakov V.S., Kapustin V.I., Svitov V.I. // Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCH-tekhnik. 2015. Iss. 2(525). P. 45–58.
7. Kapustin V.I., Li I.P., Petrov V.S., Ledencova N.E., Turbina A.V. // Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCH-tekhnik. 2016. Iss. 1(528). P. 8–18.
8. Kapustin V.I. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 1991. V. 55, № 12. P. 2455–2458.
9. Kapustin V.I. // Perspektivnye materialy. 2000. № 2. P. 5–17.