

УДК 544.45

# САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ В ДВУХСЛОЙНЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ (Ni + Al)/(PbO<sub>2</sub> + B + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + СТЕКЛО)

А. М. Шульпеков, Р. М. Габбасов, О. К. Лепакова, Н. И. Афанасьев

Томский научный центр СО РАН, 634055 Томск, shulp@yandex.ru

Широкое распространение плоских электронагревателей в технике и бытовых приборах требует поиска более простых и дешевых технологий их получения. В данной работе предложен способ получения электропроводящего покрытия (NiAl) и электроизоляционного слоя (стеклокерамика) в одну стадию — методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в термически сопряженной порошковой системе (Ni + Al)/(PbO<sub>2</sub> + B + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + стекло). Исследован процесс распространения фронта волны горения, изучено влияние толщины слоев, соотношения компонентов в порошковой смеси PbO<sub>2</sub> + B + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + стекло на скорость распространения и температуру фронта волны горения. Обнаружено расширение фронта волны экзотермического процесса при добавлении смеси PbO<sub>2</sub> + B в нижний слой. Добавление этой смеси позволяет снизить толщину слоя NiAl и обеспечить формирование однородного диэлектрического покрытия. Изучены фазовый состав и микроструктура покрытия. Установлены оптимальные соотношения толщин слоев и состава порошковой смеси слоев. Показана принципиальная возможность формирования электропроводящего и диэлектрического покрытия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в одну стадию.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, термически сопряженные системы, донор, акцептор, покрытия, пленочные нагреватели.

DOI 10.15372/FGV2023.9335  
EDN YHTARS

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований связана с широким распространением в технике и бытовых приборах плоских электронагревателей. Низкотемпературные пленочные нагреватели (настенные, «теплый пол» и т. д.) внедрены в производство [1, 2]. Но в качестве высокотемпературных нагревателей до сих пор используют нагреватели из никромовой проволоки (тэн) [3], имеющие низкий КПД. Для изготовления плоских высокотемпературных (> 500 °C) нагревателей на металлическую пластину последовательно наносится вначале электроизоляционный слой (стеклокерамика) и только потом электропроводящий слой (смесь порошков никрома, борида никеля и стекла). На каждом этапе требуется нагревать заготовку до температуры около 1 000 °C в специальных многозонных печах, использовать защитную среду [4]. Это чрезвычайно усложняет и удорожает

производство. Попытки внедрения в промышленное производство таких плоских электронагревателей не увенчались успехом из-за сложности технологии и технологического оборудования. По-прежнему актуальным остается поиск более простых и дешевых технологий получения электронагревателей.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) характеризуется низкими затратами энергии, простотой технологического оформления процесса и позволяет синтезировать широкий класс химических соединений, композиционных материалов (бориды, карбиды, нитриды, силициды, интерметаллические, наноламинантные соединения и др. [5–7]).

В данной работе предложен способ изготовления диэлектрического и электропроводящего слоев в одну стадию, что упрощает технологический процесс. Метод основан на использовании СВС в термически сопряженных системах. Основы этого метода сформулированы, в частности, в работах [8, 9]. Этот метод позволяет проводить синтез в низкоэнергетических и в эндотермических смесях. Суть ме-

Доложено на 5-й Международной конференции «Новые материалы и научноемкие технологии», 2–7 октября 2022, Томск.

© Шульпеков А. М., Габбасов Р. М.,  
Лепакова О. К., Афанасьев Н. И., 2024.

тода состоит в том, что используются две смеси: высокоенергетическая (донор), тепло от которой расходуется на синтез в низкоэнергетической (акцептор). Порошковые смеси прессуются в виде прямоугольных брикетов, причем слои донорной и акцепторной смесей чередуются. Проведено моделирование процессов в трехслойных системах (донор — акцептор — донор) [10–13], а также в многослойных, в том числе тонкопленочных системах [14–17]. Было показано, что существует оптимальное соотношение масс слоев, при котором синтез протекает полностью. Экспериментальные исследования подтверждают основные результаты моделирования [12, 18–20]. Другим вариантом проведения синтеза является метод, когда цилиндрический образец из акцепторной смеси засыпается донорной смесью [21]. Еще один способ проведения синтеза, позволяющий легко отделять продукты синтеза донорной и акцепторной смесей, — засыпка гранул из этих смесей совместно в реактор [22]. При исследовании процесса в порошковых слоях  $\text{NiO} + \text{Al}$  насыпной плотности было показано, что на скорость распространения фронта оказывает сильное влияние диспергирование продуктов реакции, приводящее к смене механизма распространения фронта волны горения [23].

Подобный способ организации процесса был использован для получения электропроводящих слоев  $\text{NiAl}$ ,  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  [24], а также электроизолирующих стеклокерамических слоев  $\text{PbO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$  [25]. В данной работе предложено объединить оба метода в единый процесс. На подложку наносят последовательно слой порошковой смеси для получения диэлектрического покрытия, а сверху — для электропроводящего слоя. При этом тепло донорной смеси  $\text{Ni} + \text{Al}$  расходуется на расплавление акцепторной смеси (порошок стекла +  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и формирование на подложке стеклокерамического слоя. Ранее было показано, что в слое порошковой смеси  $\text{Ni} + \text{Al}$  достигается температура не менее 1200 °С, и ее достаточно для расплавления стекла. В целях уменьшения толщины слоя смеси  $\text{Ni} + \text{Al}$ , что сопровождается уменьшением температуры, для достижения необходимой температуры в нижнем слое (1000 °С) предложено к смеси стекла и оксида алюминия добавлять высокоенергетическую смесь  $\text{PbO}_2 + \text{B}$ . Реакция протекает по схеме  $3\text{PbO}_2 + 2\text{B} = 3\text{PbO} + \text{B}_2\text{O}_3 + 367 \text{ кДж}$ . Ее тепловой эффект даже больше, чем у реакции

$\text{Ni} + \text{Al} = \text{NiAl} + 118.4 \text{ кДж}$ . Кроме увеличения температуры, данный прием позволяет регулировать химический состав стекла и, следовательно, его свойства.

Таким образом, целью работы являлось исследование процесса распространения фронта волны горения в двухслойных порошковых смесях  $\text{Ni} + \text{Al}$  (резистивный слой) и  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  с добавкой смеси стекла и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в качестве разбавителя и формирования стеклокерамического электроизоляционного покрытия, а также изучение структуры и свойств получаемого покрытия.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для приготовления исходной донорной смеси в массовом соотношении 69 %  $\text{Ni} + 31 \%$   $\text{Al}$  использовали никель ПНК-Л5, алюминий АСД-4. Для получения диэлектрического покрытия использовали смесь порошков  $\text{PbO}_2$  (Ч), бора аморфного марки 99A,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ХЧ), стекла марки СПМ 7. При этом отдельно готовили смесь состава 96 %  $\text{PbO}_2 + 4 \%$   $\text{B}$ , а также смесь 50 %  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 50 \%$  порошка стекла.

Смесь порошков в виде суспензии в изопропиловом спирте наносили на керамические (ВК 1, 98 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) подложки через трафарет толщиной 0.5 ÷ 1.6 мм.

Процесс распространения волны горения в верхнем слое исследовали с помощью оптического сенсора. Сенсор представлял собой фототранзистор, включенный по схеме усилителя фототока с общим коллектором. Перед оптическим окном фототранзистора устанавливали коллиматор в виде трубки длиной 20 мм с внутренним диаметром 1 мм. Сопротивление резистора в коллекторной цепи фототранзистора выбиралось таким образом, чтобы во всем диапазоне температур в эксперименте прибор находился в линейном режиме. Это позволило косвенно оценить температуру в верхнем слое.

Для того чтобы измерить температуру и скорость распространения фронта волны горения в нижнем слое, предварительно на подложку наклеивали две вольфрам-рениевые термопары ВР5/В20 так, чтобы спаи термопар находились на расстоянии 10 мм друг от друга и не касались подложки. Термопары и оптический сенсор подсоединяли к аналогово-цифровому преобразователю ЛА20USB (ЗАО «Руднев-Шиляев»), который подключали к персональному компьютеру. Для записи данных на компьютер использовали программное обеспече-

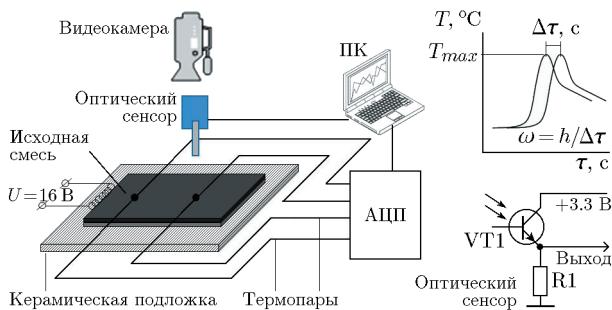


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ние производителя. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Процесс теплового взрыва исследовали следующим образом. В тигель помещали около 0.2 г порошка смеси. Тигель устанавливали в электрическую печь, подключенную к терморегулятору TPM251 (ООО «Овен»). Термопару, подключенную к терморегулятору, помещали непосредственно в тигель так, чтобы спай находился в смеси.

Рентгенофазовый анализ выполняли на портативном дифрактометре RIKOR, предоставленном Томским центром коллективного пользования СО РАН. Микроструктуру покрытия изучали с помощью оптического микроскопа Axiovert («Karl Zeiss», Германия). Видеосъемку процесса проводили высокоскоростной видеокамерой Motion ProX-3 («Imaging Solutions GmbH», Германия). Скорость распространения фронта в верхнем слое рассчитывали по изменению его положения на нескольких видеокадрах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения двухслойного композиционного покрытия на основе NiAl в качестве электропроводящего материала и изоляционного стеклокерамического покрытия необходимо, чтобы нижний слой прогрелся до температуры не менее 1000 °C. Это температура, при которой стекло, входящее в состав нижнего слоя, размягчается и образует на поверхности подложки покрытие, прочно связанное с подложкой. Такая температура может быть достигнута за счет экзотермической реакции в верхнем слое смеси порошков Ni + Al. Исследование процессов горения слоев смеси Ni + Al показало, что температура и скорость фронта повышаются с увеличением толщины слоя линейно [25]. Тем не менее для цилиндрических образцов из механоактивированной смеси Ni + Al

скорость распространения фронта волны горения зависит от диаметра немонотонно, на кривой наблюдается максимум [26]. Снижение скорости распространения фронта волны горения авторы объясняли конвективно-кондуктивным механизмом, разрыхлением исходной смеси адсорбированными газами. Отсутствие уменьшения скорости горения при увеличении толщины слоя можно объяснить значительно меньшей толщиной слоя (0.5 ÷ 1.6 мм) по сравнению с диаметром образцов в [26] (8 ÷ 12 мм). Кроме того, механоактивированные порошки, как правило, содержат на поверхности большое количество газов и паров, в том числе воды, тем более что механоактивация проводилась в воде. Эксперимент показал, что для двухслойных систем слой Ni + Al толщиной около 1.4 мм позволяет достичь необходимую температуру 1 000 °C.

Однако покрытия такой толщины слишком хрупкие, не выдерживают термических ударов и поэтому не пригодны для эксплуатации. В связи с этим необходимо снизить толщину слоев, но тонкий слой Ni + Al не обеспечивает необходимой температуры. Решением проблемы может стать введение высокоэнергетической смеси порошков PbO<sub>2</sub> и бора в смесь стекла и оксида алюминия. Кроме того, образующиеся в ходе реагирования этих компонентов оксиды свинца и бора приводят к снижению температуры размягчения стекла и вязкости расплава. Из рис. 2 видно, что введение всего

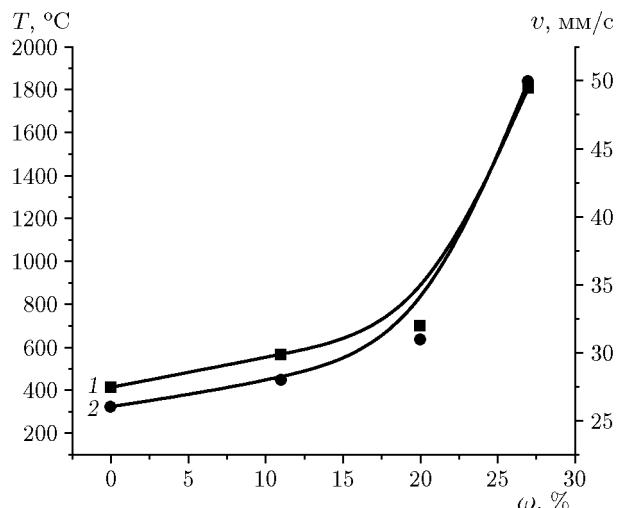


Рис. 2. Температура (1) и скорость распространения фронта волны горения (2) в зависимости от содержания смеси PbO<sub>2</sub> + B в нижнем слое

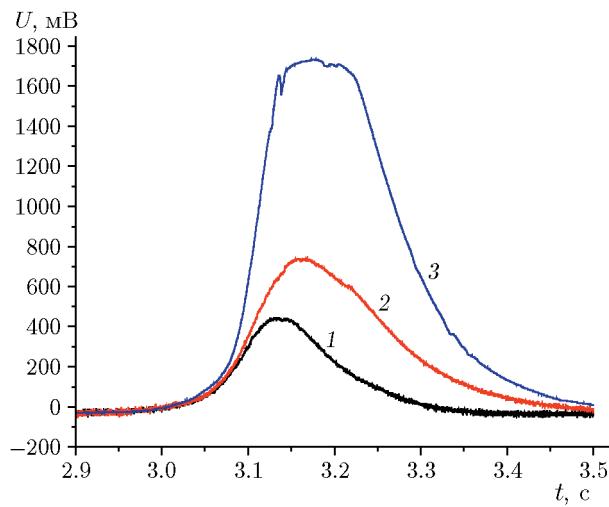


Рис. 3. Запись сигнала от сенсора в верхнем слое при содержании смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  в нижнем слое 0 (1), 20 (2), 50 % (3)

лишь  $20 \div 25\%$  смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  дает необходимую температуру  $1000^\circ\text{C}$  при толщине слоя  $\text{Ni} + \text{Al}$  0.5 мм. По данным термопарных измерений добавление смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  увеличивает также и скорость распространения тепловой волны в нижнем слое. Особенности распространения волны СВС-процесса в слое смеси  $\text{Ni} + \text{Al}$  исследовали с помощью оптического сенсора для двухслойной системы с различным содержанием смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$ .

На рис. 3 видно уширение пика сигнала. То есть максимальное значение интенсивности наблюдается не только в момент прохождения фронта волны СВС, но и за фронтом. Это уширение увеличивается с повышением содержания смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  в нижнем слое. Таким образом, подтверждается вывод о том, что в нижнем слое протекает свой процесс, который «по-

Таблица 1

Зависимость параметров теплового взрыва от содержания смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  ( $V = 100^\circ\text{C}/\text{мин}$ )

$\text{PbO}_2 + \text{B}, \%$	$T_{ign}, ^\circ\text{C}$	$T_{max}, ^\circ\text{C}$
50	332	544
60	266	652
66.7	332	742

Таблица 2

Ширина и скорость распространения фронта при горении одно- и двухслойных образцов

Номер образца	Состав покрытия	$H, \text{мм}$	$v, \text{мм}/\text{с}$
1	NiAl	6.0	5.3
2	(NiAl)/(стекло + $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	25.2	4.9
3	(NiAl)/(стекло + $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{PbO}_2 + \text{B}$ )	32.5	9.2

догревает» верхний слой и приводит к расширению в нем фронта волны. Кроме того, происходит увеличение температуры, поскольку величина сигнала от сенсора пропорциональна яркости фронта волны горения и, следовательно, его температуре.

СВС при комнатной температуре в смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  возможен лишь при содержании смеси  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и порошка стекла менее 50 %. При больших концентрациях СВС возможен лишь при подогреве смеси. Поэтому, вероятнее всего, процесс в нижнем слое протекает в режиме теплового взрыва.

В табл. 1 приведены параметры теплового взрыва в изученных составах. Видно, что температура инициирования практически не за-

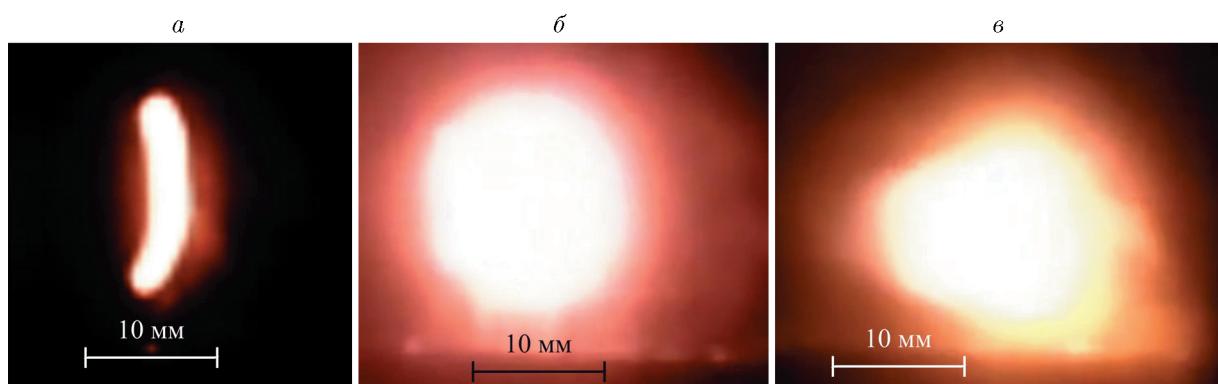


Рис. 4. Кадры видеосъемки образцов 1 (a), 2 (b), 3 (c) (см. табл. 2)

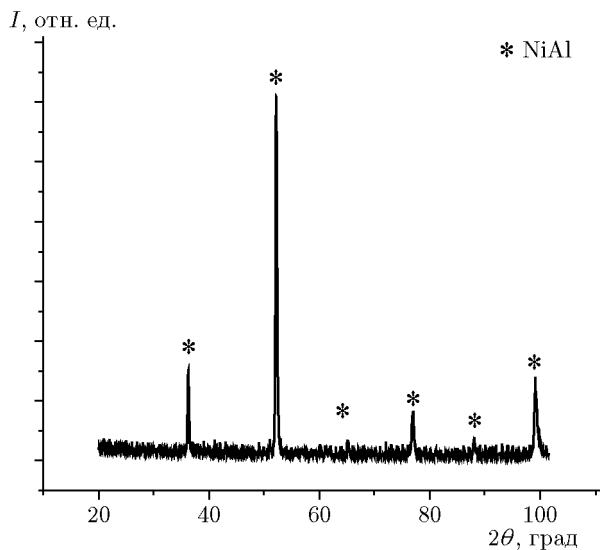


Рис. 5. Дифрактограммы образцов с содержанием смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  в нижнем слое 27 %

висит от состава, в то время как максимальная температура растет с увеличением содержания смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$ . Низкая температура инициирования процесса может свидетельствовать о том, что процесс начинается далеко перед фронтом волны в верхнем слое. Результаты видеосъемки распространения фронта волны в однослойном покрытии  $\text{Ni} + \text{Al}$ , приведенные в табл. 2, показывают, что фронт достаточно узкий и его ширина увеличивается с ростом толщины слоя.

В случае двухслойных образцов ширина фронта резко возрастает, причем для образцов с большим содержанием смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  наблюдается некая «зона догорания», связанная, вероятно, с протеканием экзотермических процессов в нижнем слое (рис. 4). Расширение фронта при отсутствии в нижнем слое смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  можно объяснить теплоизолирующими свойствами самой смеси.

Фазовый состав покрытия с содержанием смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  в нижнем слое 27 % представлен на рис. 5. Для исследования покрытие отделялось от подложки и измельчалось в порошок. Видно, что покрытие состоит из фазы NiAl. Отсутствие фазы оксида алюминия, содержащегося в смеси нижнего слоя, позволяет предположить реагирование его с оксидами свинца и бора и образование стеклообразной массы.

Микроструктура излома покрытия (рис. 6) свидетельствует об образовании двух слоев: верхний — NiAl, состоящий из мелких округлых частиц, нижний — стеклокерамиче-

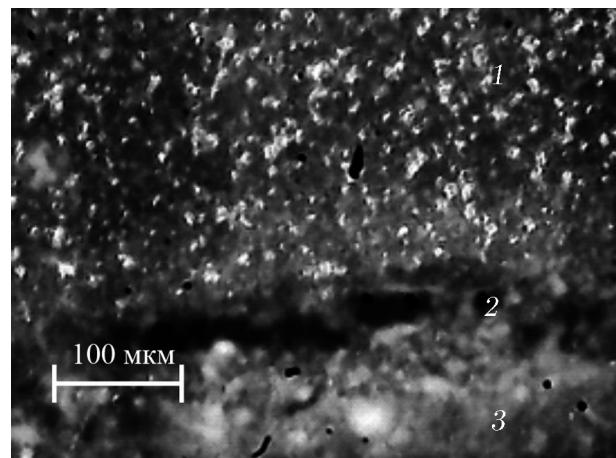


Рис. 6. Микроструктура излома покрытия:  
1 — слой NiAl, 2 — граница между слоями, 3 — нижний слой

ский, состоящий из стеклообразных частиц, сплавленных друг с другом. Между слоями четко видна граница. На рис. 7 приведена фотография покрытия, отделенного от подложки, полученная со стороны нижнего слоя. Содержание смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  в нижнем слое 60 %. Видно, что небольшое количество оксида в слое остается. Можно также заметить, что нижний слой не сплошной, а имеет достаточно большие поры, сквозь которые виден слой NiAl. Дело в том, что объем смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  намного больше объема продуктов реакции. Для однослойного образца  $\text{PbO}_2 + \text{B} + \text{стекло} + \text{Al}_2\text{O}_3$  наблюдается скатывание стекломассы в шарики. Следовательно, содержание смеси  $\text{PbO}_2 + \text{B}$  следует ограничивать до 20 ÷ 25 %.

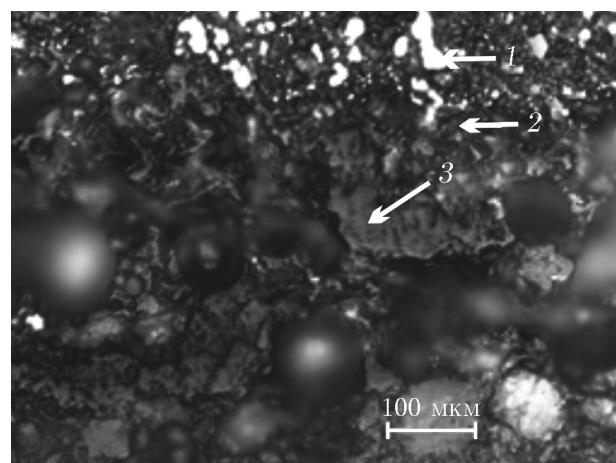


Рис. 7. Микроструктура поверхности нижнего слоя покрытия:  
1 —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2 — нижний слой, 3 — NiAl

## ВЫВОДЫ

Показана возможность получения двухслойного электропроводящего и диэлектрического покрытия методом СВС. Установлены оптимальные соотношения толщин слоев и составы порошковой смеси слоев. Добавление смеси  $PbO_2 + B$  в нижний слой позволяет снизить толщину слоя NiAl и обеспечить формирование однородного диэлектрического покрытия. Обнаружен эффект расширения волны экзотермического процесса при добавлении смеси  $PbO_2 + B$  в нижний слой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 100353 РФ. Пленочный электронагреватель / Полевой Б. Г., Попов В. М. — Заявл. 20.04.2010, опубл. 10.12.2010.
2. Пат. 2748158 РФ. Гибкий нагревательный прибор / Алешин Д. А., Беляев Е. Н., Зинченко И. В., Клямко А. А., Хаянен М. В. — Заявл. 21.04.2020, опубл. 20.05.2021.
3. Пат. 113625 РФ. Керамический нагреватель для инфракрасных кабин (Саун) / Екимов С. В. — Заявл. 03.10.2011, опубл. 20.02.2012.
4. Пат. 0097112522 РФ. Нагреватель электрический плоский стальной / Духовный Л. И., Шелехов И. Ю., Шапран Л. А. — Заявл. 20.04.2010, опубл. 10.12.2010.
5. Прибытков Г. А., Барановский А. В., Коржова В. В., Фирсина И. А., Коростелева Е. Н. Синтез интерметаллидов титан — никель из механоактивированных порошковых смесей // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 6. — С. 66–74. — DOI: 10.15372/FGV20220606. — EDN: TDQCEN.
6. Кочетов Н. А. Влияние механической активации и содержания металлической связки на горение в системе  $Ti + 2B + x(Fe + Co + Cr + Ni + Al)$  // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 49–57. — DOI: 10.15372/FGV20220205. — EDN: DHFJHS.
7. Корчагин М. А., Гаврилов А. И., Гришина И. В., Дудина Д. В., Ухина А. В., Богонов Б. Б., Ляхов Н. З. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез монофазных MAX-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  в механически активированных смесях исходных реагентов // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 1. — С. 53–61. — DOI: 10.15372/FGV20220105. — EDN: DLPCFU.
8. Мержанов А. Г. Термически сопряженные процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Докл. АН. — 2010. — Т. 434, № 4. — С. 489–492. — EDN: NBSZQL.
9. Ксандопуло Г. И., Байдельдинова А. Н. Горение в системе сопряженных слоев и высокотемпературный синтез материалов // Журн. прикл. химии. — 2004. — Т. 77, № 3. — С. 370–374. — EDN: OZEXPN.
10. Писклов А. В., Прокофьев В. Г., Смоляков В. К. Безгазовое горение слоевого пакета в неадиабатических условиях // Изв. вузов. Цв. металлургия. — 2006. — № 5. — С. 102–108. — EDN: JWSYUL.
11. Прокофьев В. Г., Смоляков В. К. К теории процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в слоевых системах // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 5. — С. 160–166. — EDN: PDIUHL.
12. Габбасов Р. М., Китлер В. Д., Прокофьев В. Г., Шульпеков А. М. Термически сопряженные СВС-процессы в слоевой системе  $(Ni + Al)/(Co + Ti)/(Ni + Al)$ : экспериментальное и теоретическое исследование // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. — 2021. — Т. 15, № 4. — С. 20–29. — DOI: 10.17073/1997-308X-2021-4-20-29. — EDN: XAABZA.
13. Prokof'ev V. G. Thermally coupled SHS processes: numerical modeling // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2022. — V. 31, N 3. — P. 109–113. — DOI: 10.3103/S1061386222030074.
14. Прокофьев В. Г., Смоляков В. К. Безгазовое горение системы термически сопряженных слоев // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 70–75. — DOI: 10.15372/FGV20160108. — EDN: VOHYNF.
15. Прокофьев В. Г., Лапшин О. В., Смоляков В. К. Макрокинетика горения слоевых композиций с легкоплавким инертным слоем // Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика. — 2018. — № 52. — С. 102–113. — DOI: 10.17223/19988621/52/10.
16. Лапшин О. В., Смоляков В. К. К теории горения тонкопленочных структур // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 47–52. — EDN: RNKQCB.
17. Prokof'ev V., Khudyakova T. Modeling of combustion synthesis in multilayer gasless system // Therm. Sci. — 2019. — V. 23, Suppl. 2. — P. S569–S573. — DOI: 10.2298/TSCI19S2569P.
18. Габбасов Р. М., Китлер В. Д., Прокофьев В. Г., Шульпеков А. М. Особенности распространения волны горения в сопряженных системах порошковая смесь  $Ni + Al + Al_2O_3$  — металлическая пластина // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 64–70. — DOI: 10.15372/FGV20220207. — EDN: FERZPQ.
19. Линде А. В., Студеникин И. А., Кондаков А. А., Гречев В. В. Экспериментальная диагностика термически сопряженных процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в слоевой системе

- $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}/\text{Ti} + \text{Al}$  // Горение и взрыв. — 2019. — Т. 12, № 1. — С. 108–115. — DOI: 10.30826/CE19120113. — EDN: ZABXGX.
20. Сеплярский Б. С., Кочетков Р. А., Лисина Т. Г., Абзалов Н. И. Закономерности горения термически сопряженных гранулированных смесей ( $\text{Ni} + \text{Al}$ ) — ( $\text{Ti} + \text{C}$ ) // Горение и взрыв. — 2019. — Т. 12, № 3. — С. 155–164. — DOI: 10.30826/CE19120317. — EDN: UNGYTS.
21. Милюкова И. В., Юнусов Р. Д. Термостимуляция синтеза алюминида титана высококалорийными смесями // Вестн. Югор. гос. ун-та. — 2019. — № 4 (55). — С. 17–23. — DOI: 10.17816/byusu20190417-23. — EDN: ACWPUG.
22. Альмов М. И., Сеплярский Б. С., Кочетков Р. А., Лисина Т. Г. Новый подход к проведению термически сопряженных процессов на примере гранулированной смеси ( $\text{Ni} + \text{Al}$ ) — ( $\text{Ti} + \text{C}$ ) // Докл. АН. — 2019. — Т. 487, № 1. — С. 45–48. — DOI: 10.31857/S0869-5652487145-48. — EDN: HBQFLQ.
23. Икорников Д. М., Санин В. Н., Юхвид В. И. Горение термитных систем в тонких слоях с открытой поверхностью // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 91–97. — EDN: OOFRFT.
24. Шульпеков А. М., Габбасов Р. М., Лепакова О. К. Горение в слоевых порошковых смесях  $\text{Ni} + \text{Al}$  и  $\text{Ti} + \text{Al} + \text{C}$ . // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. — 2021. — № 1. — С. 31–37. — DOI: 10.17073/1997-308X-2021-1-31-37. — EDN: CMZHFQ.
25. Шульпеков А. М. Стеклокерамические СВС — покрытия для пленочных электронагревателей // Актуальные проблемы современной науки. — 2017. — Т. 93, № 2. — С. 212–215.
26. Кочетов Н. А., Сеплярский Б. С. Зависимость скорости горения от размера образца в системе  $\text{Ni} + \text{Al}$  // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 4. — С. 29–35. — EDN: SKIOXL.

Поступила в редакцию 16.03.2023.

Принята к публикации 05.04.2023.