



УДК 536.421.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-4-4

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СПЕКАНИЕ СЕРЕБРОСО-
ДЕРЖАЩЕЙ ПАСТЫ ПРИ СОЕДИНЕНИИ КРЕМНИЯ С
МОЛИБДЕНОМ**

В.И. Лукин

доктор технических наук

В.С. Рыльников

кандидат технических наук

Ю.В. Лощинин

К.Н. Нищев

кандидат физико-математических наук

Июль 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 536.421.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-4-4

В.И. Лукин¹, В.С. Рыльников¹, Ю.В. Лощинин¹, К.Н. Нищев²

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СПЕКАНИЕ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩЕЙ ПАСТЫ ПРИ СОЕДИНЕНИИ КРЕМНИЯ С МОЛИБДЕНОМ

Исследованы тепловые эффекты, происходящие при сушке и спекании серебрясодержащей пасты, применяемой для получения низкотемпературных соединений в системе «кремний на молибдене» для полупроводниковых приборов. Исследовано изменение формы и размера частиц серебра в процессе сушки серебрясодержащей пасты при различных температурах. Исследована зависимость микротвердости спеченных слоев, полученных при различных технологических режимах.

Ключевые слова: серебрясодержащая паста, кремний на молибдене, серебряное покрытие, спекание, спеченный слой.

V.I. Lukin, V.S. Ryl'nikov, U.V. Loshinin, K.N. Nischev

LOW-TEMPERATURE AGGLOMERATION OF ARGENTIFEROUS PASTE AT CONNECTION SILICON WITH MOLYBDENUM

The article is about investigating of heat effects taking place while drying and sintering of silver containing paste, used to get low temperature joints in system of «Si on Mo» for semiconductor elements. It was investigated the modifications in form and size of silver particles taking place during drying at different temperatures. The relationship between micro hardness of sintered layers and temperature was investigated.

Keywords: silver containing paste, Si on Mo, silver coating, sintering, sintered layer.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

²Институт физики и химии Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева [Physics and Chemistry Institute Ogarev Mordovia state university] E-mail: inst-phys-chem@adm.mrsu.ru

Введение

Технологии получения соединений разнородных материалов в ряде случаев позволяют реализовать уникальное сочетание свойств с использованием преимуществ отдельных компонентов, входящих в состав композиционной структуры. В силовой электронике активно осваивается технология изготовления полупроводниковых приборов с применением низкотемпературного спекания серебрясодержащей пасты в системе «кремний на молибдене» (технология КНМ). По этой технологии процесс соединения спеканием состоит из трех основных этапов: нанесение пасты на основе специального серебряного порошка, сушка без давления и спекание под давлением. Данная технология позволяет создавать контактные соединения в силовых полупроводниковых приборах с более высокими электрическими и термомеханическими свойствами, а также с увеличенным сроком службы по сравнению с действующими технологиями. Соединение происходит в результате твердотельной реакции, без образования жидкой фазы [1–12].

Материалы и методы

В статье приведено исследование процесса спекания серебрясодержащей пасты в свободном состоянии без приложения давления. Процессы, протекающие в пасте при нагреве, принципиально важны для разработки технологии получения структуры КНМ.

По условиям изготовления порошок серебра содержит до 0,5% (по массе) восков – углеводов с длинными цепочками, представляющими собой главным образом натриевые и калиевые соли стеариновой, пальмитиновой и масляной кислот, которые добавляют на стадии получения порошка. Благодаря их наличию порошок очень хорошо образует суспензии в органических растворителях. На заключительной стадии после перемалывания в атриторе порошок отмывается от воска, но полное удаление воска невозможно, так как значительная его часть хемисорбируется серебром. Для получения наиболее плотного спеченного слоя серебра перед процессом спекания необходимо удалить из серебрясодержащей пасты органические соединения, которые могут препятствовать образованию металлических связей между отдельными частицами серебра.

Низкомолекулярные соединения имеют невысокую температуру кипения (~100–150°C) и удаляются из серебрясодержащей пасты при сушке даже при комнатной температуре. Для ускорения процесса их удаления используют низкотемпературный нагрев при температурах до 150°C.

Однако высокомолекулярные соединения типа восков могут иметь температуру кипения $\sim 400^\circ\text{C}$ и практически не удаляются при низких температурах, что делает процесс их удаления затруднительным. Эта задача дополнительно осложняется тем, что для удаления восков необходимо произвести термоокислительную деструкцию соединений серебра с восками. В процессе изготовления частицы серебра подвергаются интенсивному наклепу для улучшения спекаемости при последующем прессовании спеченного слоя. Применение высокотемпературной сушки (при температуре $\sim 400^\circ\text{C}$) недопустимо, так как при столь высокой температуре происходят процессы релаксации напряжений в порошке серебра. Уменьшение внутренней энергии частиц серебра приведет к снижению интенсивности процессов последующего спекания спеченного слоя. Поэтому была проведена серия экспериментов по отработке технологии сушки серебросодержащей пасты.

Результаты и обсуждение

Анализ температур изменения структурного состояния и изменения массы пасты при нагревании в диапазоне температур от 20 до 1000°C проведен методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА) с применением термоанализаторов DSC 404 F1 и STA 449 фирмы NETZSCH-Geratebau GmbH (Германия).

Кривые ДСК получены при нагревании навесок серебросодержащей пасты на воздухе и в среде гелия (поток газа 50 мл/мин) в тигле из оксида алюминия. Нагрев производился со скоростью 20 К/мин в диапазоне температур от 20 до 1000°C . При нагреве в среде гелия не происходит окисления органических составляющих паст, поэтому оценка процессов, протекающих при нагреве на воздухе, в сравнении с данными, полученными при нагреве в среде гелия, позволяет определить влияние процесса окисления. Слои пасты, наносимые на соединяемые поверхности, могут быть различной толщины. При непрерывном нагреве процессы испарения и окисления органических составляющих из ленты могут зависеть от толщины ленты, поэтому в экспериментах использовали две толщины слоя пасты, из которых изготавливались образцы, имеющие массу ~ 75 и ~ 300 мг соответственно. Кривые ТГА получены при нагревании образцов паст массой ~ 300 мг на воздухе со скоростью 20 К/мин.

На кривых ДСК (рис. 1 и 2) видны эндотермические и экзотермические эффекты. На рис. 1, *а* укрупненно показана кривая в области температур $150\text{--}400^\circ\text{C}$ при нагреве на воздухе, а на рис. 1, *б* – при нагреве в среде гелия. На рис. 1, *б* заметен эндотермический эффект в интервале температур $150\text{--}180^\circ\text{C}$, связанный с испарением рас-

творителей из пасты. При нагреве на воздухе этот эффект (см. рис. 1, *a*) маскируется тепловыделением при окислении растворителя: пики при температурах 219°C (см. рис. 1, *a*) и 230°C (см. рис. 1, *б*) соответствуют термодеструкции органической составляющей пасты. Температура окислительной термодеструкции $T_{ок}=268^{\circ}\text{C}$, характеризующая выгорание органической составляющей пасты (см. рис. 1, *a*), не заметна при нагреве в среде гелия (см. рис. 1, *б*). При температуре 337°C на кривой при нагреве в среде гелия (см. рис. 1, *б*) заметен эндотермический эффект, связанный, по-видимому, с испарением более высокомолекулярных составляющих пасты. На кривой на рис. 1, *a* этот эффект маскируется выгоранием составляющих пасты при нагреве на воздухе.

На кривой ТГА при нагреве навески массой ~ 300 мг на воздухе (рис. 3) начало интенсивного уменьшения массы происходит при температуре $\sim 120^{\circ}\text{C}$, что соответствует началу интенсивного испарения органических растворителей из пасты. После 500°C уменьшения массы не происходит, что свидетельствует о полном удалении органических соединений.

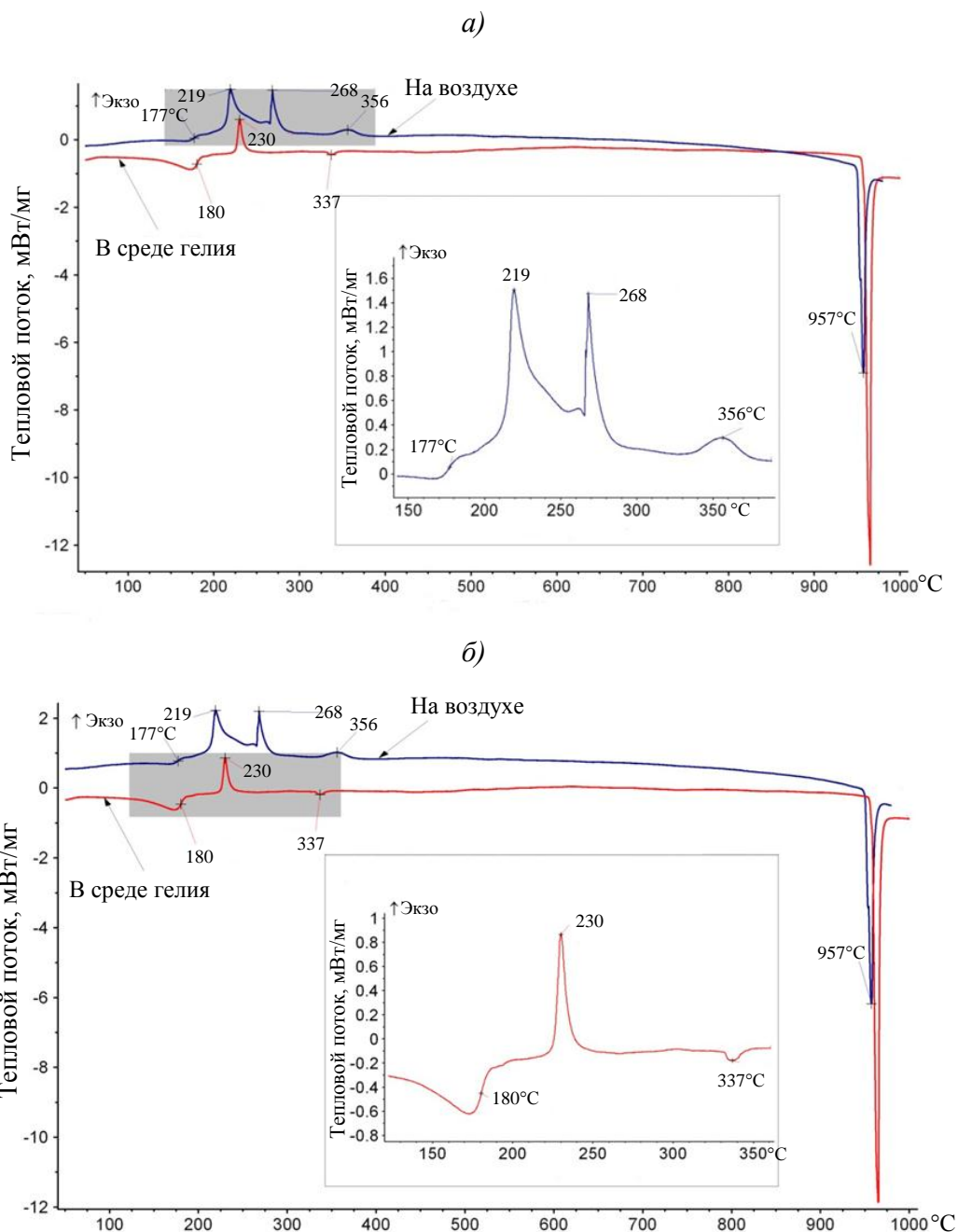


Рис. 1. Кривые ДСК при нагреве со скоростью 20 К/мин навески материала пасты массой ~300 мг в потоке воздуха (а) и гелия (б)

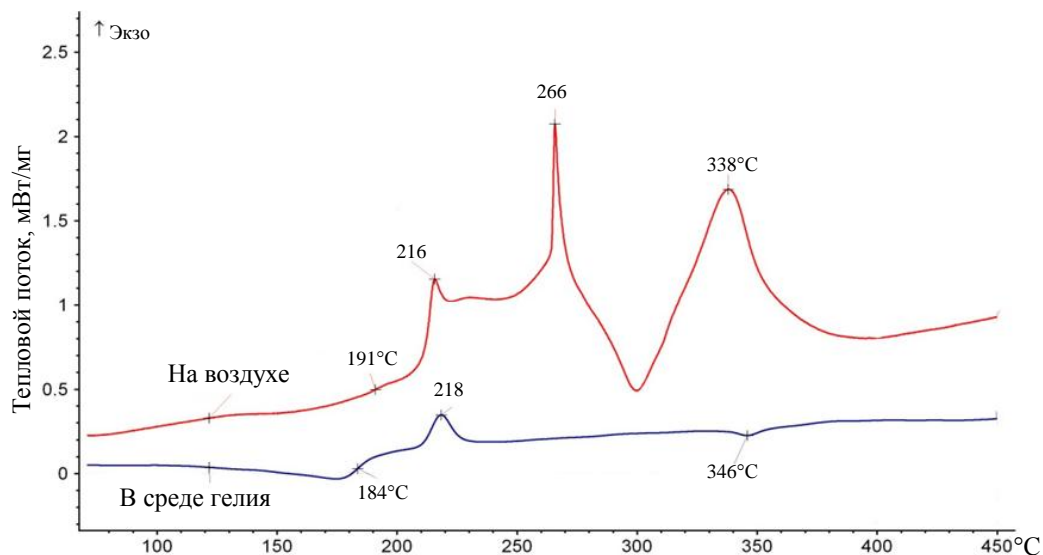


Рис. 2. Кривые ДСК при нагреве со скоростью 10 К/мин навески пасты массой ~75 мг на воздухе и в потоке гелия

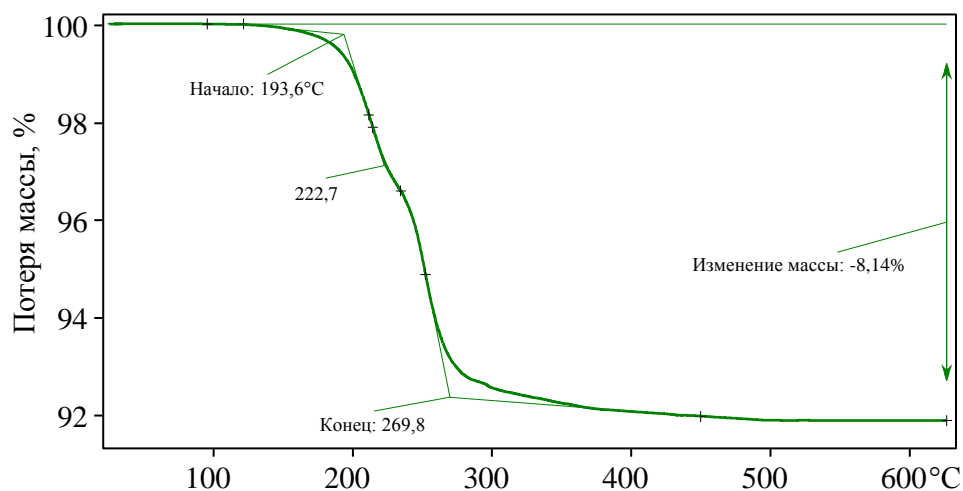


Рис. 3. Кривая ТГА при нагреве навески пасты массой ~300 мг на воздухе со скоростью 20 К/мин

Наблюдается также температура плавления серебра $T_{\text{пл}}=957^{\circ}\text{C}$ – наполнителя материала пасты (см. рис. 1). Отличие этой температуры плавления серебра от справочной ($960,1^{\circ}\text{C}$) можно объяснить снижением точности определения из-за малой массы образца.

Сравнивая кривые при нагреве в среде гелия на рис. 1, б и 2 с различной массой навесок, необходимо отметить, что тепловые эффекты на образце с меньшей навеской существенно ниже, чем на образце с большей навеской. Такие же кривые при нагреве на воздухе имеют качественные отличия по значениям тепловых эффектов при температурах 266 и 338°C, что свидетельствует о большей интенсивности выгорания более высокотемпературных составляющих пасты, чем растворители в пасте. Это связано с тем, что в тонких слоях пасты выход к внешней поверхности испаряющихся газов легче, чем в толстых слоях. Из этого следует, что процессы, происходящие в слоях пасты при анализе методом ДСК со скоростью 10 К/мин, не успевают завершиться полностью при такой скорости нагрева и необходимо исследовать удаление органических связующих в процессе длительных выдержек при постоянных температурах.

Для исследования возможности снижения температуры сушки выбраны температуры 100 и 150°C. Снижение температуры сушки серебросодержащей пасты перспективно с целью максимального сохранения наклепанного состояния частиц серебра. Продолжительность выдержки образцов серебросодержащей пасты массой ~300 мг при сушке на воздухе составляла от 15 до 60 мин (см. таблицу). Затем эти образцы после сушки исследовали методом ДСК при нагреве со скоростью 20 К/мин в потоке воздуха (рис. 4). Сравнение кривых ДСК, полученных на образцах без предварительной сушки (см. рис. 1, а), и кривых после сушки при различных температурах (см. рис. 4) показывает, что после сушки происходит изменение соотношения экзотермических пиков при температурах ~217 и ~260°C, соответствующих выгоранию легколетучих органических составляющих (217°C) и окислительной термодеструкции основной массы пасты (260°C), причем пики при температурах ~217°C существенно ниже, чем при температурах ~260°C. При увеличении температуры сушки и продолжительности выдержки при сушке выделение энергии при температурах ~217 и ~260°C и общее выделение энергии (H) также уменьшается (см. таблицу). При этом пик при 338°C на кривых после сушки отсутствует. Это свидетельствует об эффективности сушки для удаления органических остатков из пасты, причем сушка при 150°C более эффективна, чем при 100°C.

Режимы сушки слоев серебросодержащей пасты без последующего спекания

Условный номер режима	Температура сушки, °C	Длительность сушки, мин	H , Дж/г
I	100	60	306
II	150	15	243
III	150	60	211

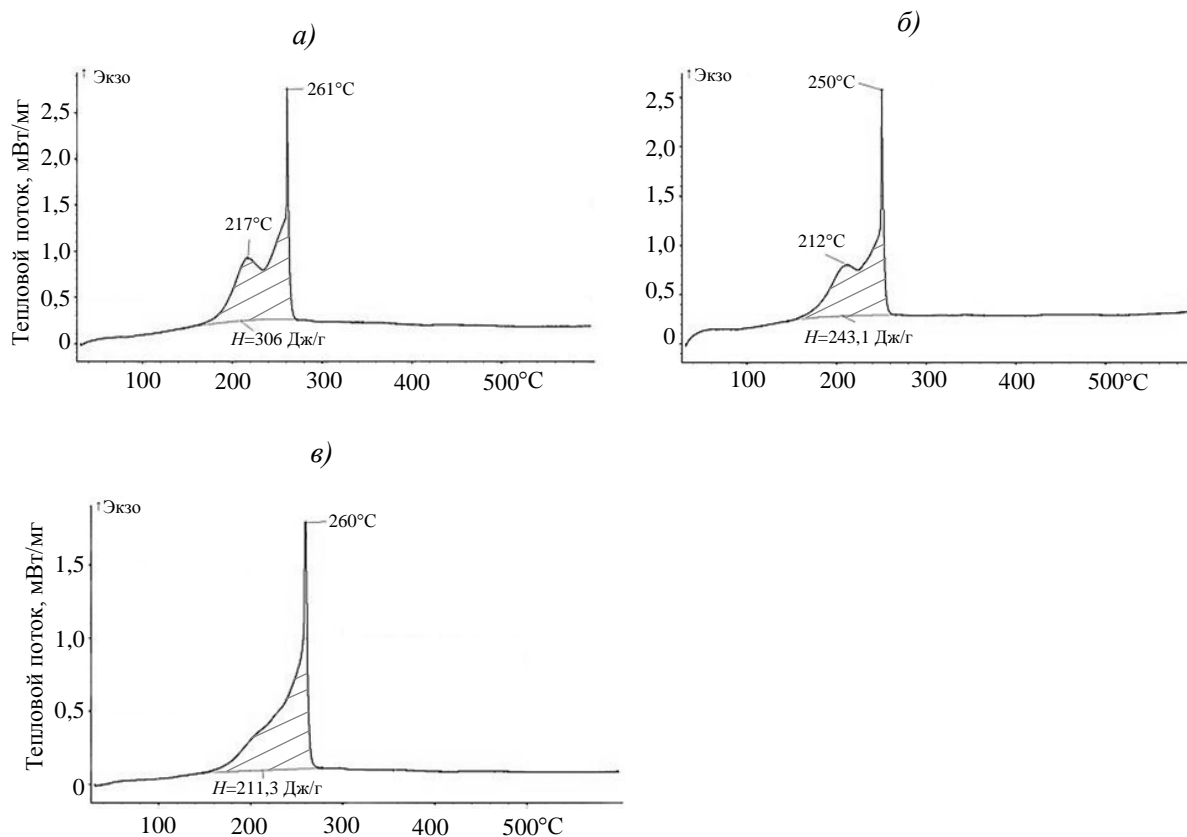


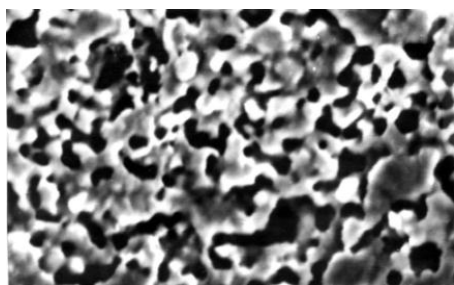
Рис. 4. Результаты ДСК при нагреве со скоростью 20 К/мин навески пасты массой ~300 мг в потоке воздуха образцов спеченного слоя, термообработанных по режимам (см. таблицу) I (а), II (б) и III (в)

В процессе сушки слоя пасты кроме процессов удаления органических составляющих пасты происходят сложные процессы взаимодействия частиц серебра, определяющие формирование спеченного слоя. Появляются механические связи между частицами порошка. По мере повышения температуры нагрева эти механические связи усиливаются за счет диффузионного обмена в местах контакта серебряных частиц. При этом контакт за счет адгезионных сил между частицами от взаимодействия остатков восков, хемисорбируемых серебром, постепенно сменяется металлической связью одновременно с выгоранием или деструкцией восков. Именно образование металлического контакта из-за срачивания частиц серебра и характеризует процесс спекания. В начале спекания слоя пасты в свободном состоянии этот слой представляет собой малопрочную субстанцию, в которой частицы серебра легко отделяются друг от друга при незначительных механических воздействиях.

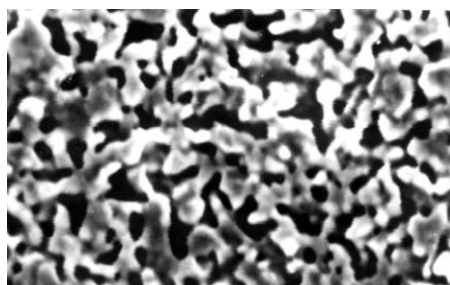
Известно, что кинетика спекания гранулированного порошка оценивается по увеличению зоны контакта между гранулами из-за поверхностной диффузии материала с поверхности гранул в зону контакта (спекание по Кучинскому). Но хлопьевидные частицы серебра в пасте очень далеки по форме от сферических частиц по Кучинскому, поэтому оценка кинетики спекания по изменению ширины шеек между частицами серебра имеет недопустимо большой разброс значений (в сотни раз). На рис. 5 видно, что после сушки при 150°C частицы серебра представляют собой чешуйки с небольшими контактами между собой, со сложной разветвленной формой с мелкими выступающими деталями. Оценка пористости после нагрева на воздухе при 150°C, выполненная методом количественной металлографии, на снимках, представленных на рис. 5, дает значения 17–21%. Поверхность слоя пасты после такой термообработки имеет цвет со значительными оттенками серого. После нагрева при 220°C заметно уменьшилась разветвленность формы частиц и количество мелких выступающих деталей на них. Кроме того, между частицами появляются перемычки. Пористость в связи с такими изменениями формы частиц несколько увеличилась – до 20–27%, причем цвет частиц стал преимущественно белым, серебряным. На образце 8 (см. рис. 5) есть участки с серым и белым цветом. После нагрева при 300°C форма частиц существенно изменилась, произошло их укрупнение. Между частицами появились перемычки, пористость составила 23–28%. При этом размеры пор увеличились после нагрева при 300°C по сравнению с нагревом при 150°C. Цвет поверхности после этого нагрева белый, серебряный. Таким образом, изменение цвета спеченного слоя с серого на белый, серебряный свидетельствует об интенсивном образовании перемычек между частицами серебра, сопровождающих спекание этих частиц.

Невозможно производить оценку кинетики спекания по изменению пористости и цвета спеченного слоя, поэтому в качестве характеристики механической прочности спеченного слоя выбрана микротвердость по Виккерсу. Использовали образцы пластин из сплава АМц размером 20×20 мм, на которые наносили слой серебросодержащей пасты толщиной 150–200 мкм. Исследовали влияние технологических характеристик спекания слоев паст нескольких марок, таких как продолжительность выдержки при нагреве, температура нагрева при спекании слоев малой толщины на подложке из слоя пасты после его высушивания при температурах от 120 до 300°C и продолжительности выдержки при температурах сушки – от 10 мин до 10 ч. Использование при исследованиях спеченных слоев малой толщины очень важно, так как при увеличении толщины спеченного слоя возможно изменение кинетики и даже механизма протекания процес-

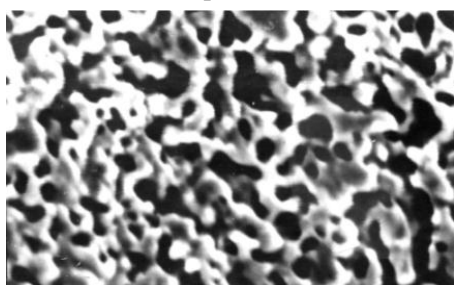
сов спекания из-за экранирования внутренних слоев покрытия наружными слоями от внешней атмосферы.



Образец 1



Образец 2



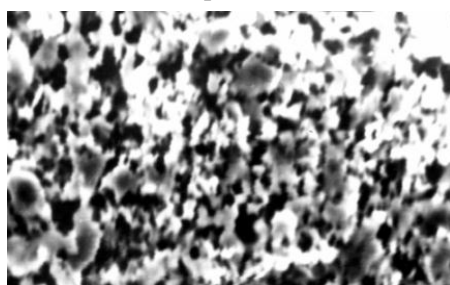
Образец 3



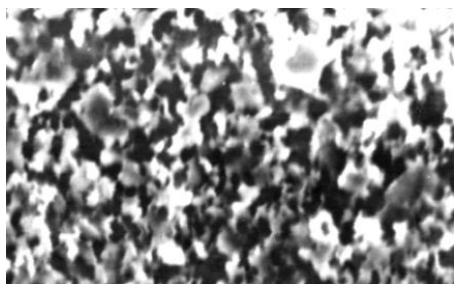
Образец 4



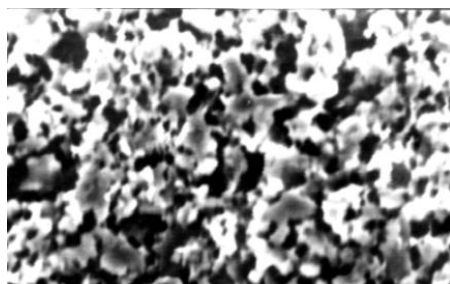
Образец 5



Образец 6



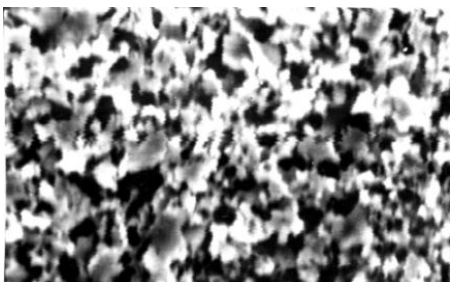
Образец 7



Образец 8



Образец 9



Образец 10

Рис. 5. Микроструктуры ($\times 5000$) поверхности серебрясодержащей пасты после нагрева на воздухе при различных температурах и выдержке 10 мин, с оценкой цвета и пористости (объем пор – в %):

- термообработка при 300°C (белый цвет): 23,69 (1), 23,07 (2), 28,29 (3);
- термообработка при 150°C (серый цвет): 17,22 (4), 21,33 (5), 17,89 (6);
- термообработка при 220°C (белый цвет; серый цвет (8)): 23,76 (7), 27,45 (8), 24,73 (9), 20,63 (10)

Появление перемычек между частицами приводит к росту прочности спеченного слоя. При определении микротвердости спеченного слоя индентор сминает и раздвигает частицы порошка. Когда порошок находится в свободном состоянии (не спечен) индентор практически не испытывает сопротивления своему движению и соответственно слой не имеет твердости. Образование связей между частицами затрудняет движение индентора и появляется возможность определения микротвердости спеченного порошка. Соответственно, при увеличении степени спеченности порошка (увеличении количества и размера образовавшихся связей) происходит рост микротвердости. Таким образом, микротвердость спеченных слоев характеризует количество и прочность связей между отдельными частицами и, соответственно, может являться характеристикой механических свойств спеченных слоев, что делает возможной оценку кинетики спекания по изменению микротвердости в зависимости от температуры и продолжительности нагрева.

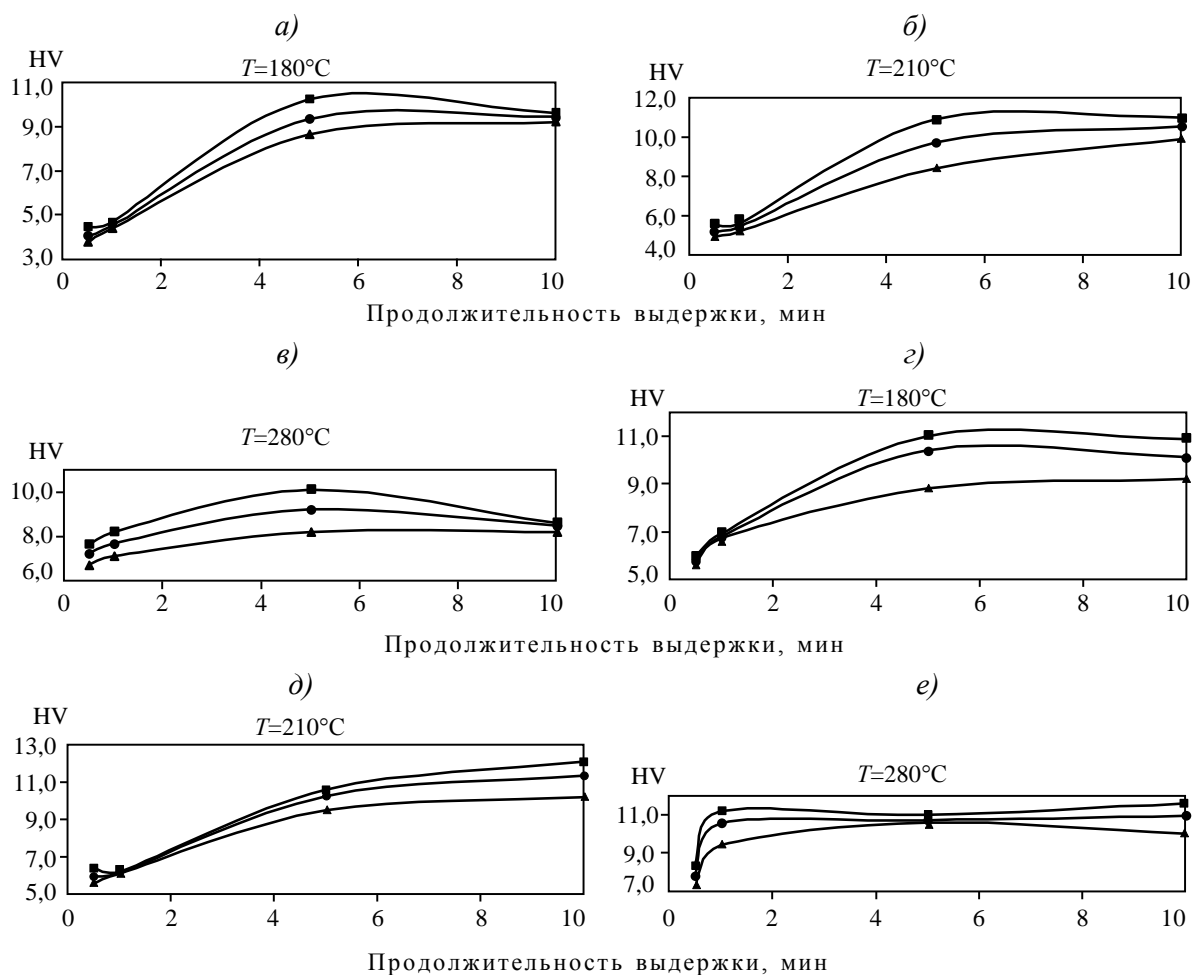


Рис. 6. Зависимость микротвердости (HV) спеченных слоев от продолжительности выдержки на воздухе для различных температур нагрева паст LTS043 (а–в) и ASP131 (г–е) при исследовании трех образцов при каждой температуре (T)

Для удаления летучих органических соединений из органического связующего пасты после нанесения ее на образцы проводили сушку на воздухе в течение 10 ч. Нагрев образцов выполняли в свободном состоянии (без приложения давления). При спекании термостол прогревали до заданной температуры, выдерживали в течение 5 мин для стабилизации температуры и выравнивания температурного поля по всей рабочей поверхности. После этого на рабочую поверхность термостола помещали образец и выдерживали в течение заданного времени. После остывания образца определяли микротвердость полученного слоя на микротвердомере Dura Scan 20. Микротвердость измеряли не менее чем в 3 точках, расположенных не ближе 2 мм от краев образца и не ближе 1 мм друг от друга. Результаты исследований для различных серийных паст приведены на рис. 6. При этом стоит обратить внимание на то, что для пасты марки LTS043 при температуре 280°C с увеличением длительности выдержки с 5 до 10 мин происходит некоторое снижение микротвердости, что, скорее всего, вызвано процессом коагуляции частиц серебра, приводящее к увеличению пористости спеченного слоя.

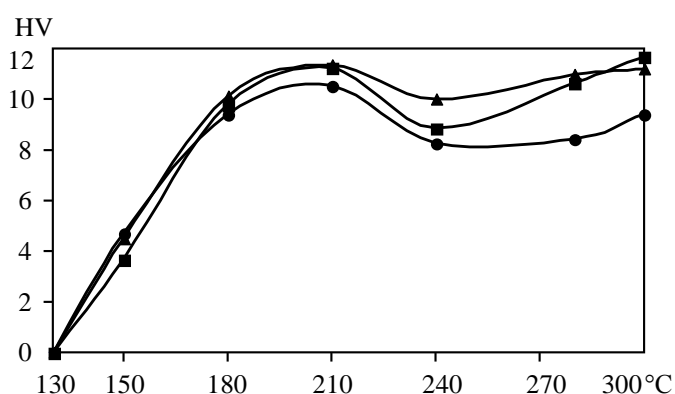


Рис. 7. Зависимости микротвердости (HV) спеченного слоя от температуры спекания для паст марок LTS016-09P2 (●), LTS043-04P2 (■) и ASP131-06P2 (▲)

Для оценки зависимости микротвердости от температуры спекания на воздухе длительность выдержки при спекании составляла 10 мин (рис. 7). Из приведенных на рис. 7 данных видно, что процесс спекания всех исследованных паст начинается при температуре $>130^{\circ}\text{C}$. Основной рост микротвердости для всех исследованных паст происходит в интервале температур 150–180°C. При повышении температуры наряду с

окислительной деструкцией органических составляющих паст происходит спекание частиц серебра. Эти процессы определяют зависимость микротвердости спеченного слоя от температуры спекания $>180^{\circ}\text{C}$. Снижение микротвердости при спекании без сжатия серебряного порошка $>210^{\circ}\text{C}$ происходит из-за увеличения пористости, сопровождающееся образованием крупных пор.

Заключения

Исследование при нагреве на воздухе тепловых эффектов, полученных на образцах без предварительной сушки и после сушки на воздухе при 150°C , показывает, что изменилось выделение тепла при температурах $\sim 217^{\circ}\text{C}$ и $\sim 260^{\circ}\text{C}$, соответствующих выгоранию легколетучих органических составляющих (217°C) и окислительной термодеструкции основной массы пасты (260°C). Таким образом, сушка на воздухе при 150°C позволяет существенно сократить содержание органических составляющих в пасте.

Изменение цвета спеченного слоя с серого на белый, серебряный после сушки при температуре $>220^{\circ}\text{C}$ свидетельствует об образовании перемычек между частицами серебра, сопровождающих спекание этих частиц.

Целесообразно производить оценку кинетики спекания по изменению микротвердости спеченного слоя в зависимости от температуры и продолжительности нагрева. Увеличение микротвердости слоев серебряносодержащей пасты начинается при температурах $>130^{\circ}\text{C}$. Основной рост микротвердости спеченного слоя происходит в интервале температур $150\text{--}180^{\circ}\text{C}$. При повышении температуры наряду с окислительной деструкцией органических составляющих паст происходит спекание частиц серебра. Эти процессы определяют зависимость микротвердости спеченного слоя от температуры спекания $>180^{\circ}\text{C}$. Снижение микротвердости при спекании без сжатия серебряного порошка $>210^{\circ}\text{C}$ происходит из-за увеличения пористости, сопровождающееся образованием пор увеличенных размеров.

Процессы, протекающие в пасте при нагреве, принципиально важны для разработки технологии соединения материала КНМ. Знание термических и фазовых реакций при нагреве необходимо для разработки технологии сушки, максимально удаляющей органические составляющие из пасты до проведения операции спекания КНМ.

Работа выполнена в рамках договора №02.G25.31.0051 между ОАО «Электровыпрямитель» и Министерством образования и науки РФ об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–51.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. №SP2. С. 174–183.
4. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сухова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
5. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
6. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеи для многоразовой космической системы //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 04 (viam-works.ru)
7. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 328–335.
8. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Чурсова Л.В. Свойства и назначение клея ВК-36РМ для авиационной техники //Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №8. С. 5–6.
9. Lukina N.F., Dement'eva L.A., Serezhnikov A.A. et al. Adhesive prepregs and composite materials on their bases //Russian J. of General Chemistry. 2011. V. 81. №5. P. 1022–1024.
10. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Сереженков А.А. и др. Клеевые препреги и композиционные материалы на их основе //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 53–56.
11. Zhang Zhiye (Zach), Lu Guo-Quan. Pressure-Assisted Low-Temperature Sintering of Silver Paste as an Alternative Die-Attach Solution to Soldez Reflow //Trans. Ind. Applicat. 2002. V. 25. №4. P. 279–283.

12. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Куцевич К.Е., Нищев К.Н. Метод определения прочности сцепления серебряного покрытия с кремниевой подложкой с использованием клея //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №6. С. 34–36.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
2. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Nickel foundry hot strength alloys of new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 36–51.
3. Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F. Novyj klass sloistyh aljumostrukturnykh plastikov na osnove aljuminij-litievogo splava 1441 s ponizhennoj plotnost'ju [New class layered alyumostekloplastikov on basis aluminum-lithium alloy 1441 with lowered density] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. 2011. №SP2. S. 174–183.
4. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnykh splavov s monokristallicheskoj i kompozicionnoj strukturoj [Development of process of the directed crystallization of blades of GTD from hot strength alloys with single-crystal and composition structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
5. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat resisting cast intermetallidny alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 57–60.
6. Petrova A.P., Lukina N.F. Klei dlja mnogorazovoj kosmicheskoj sistemy [Glues for reusable space system] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 04 (viam-works.ru).
7. Lukina N.F., Dement'eva L.A., Petrova A.P., Serezhenkov A.A. Konstrukcionnye i termostojkije klei [Constructional and heat-resistant glues] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 328–335.

8. Kucevich K.E., Dement'eva L.A., Lukina N.F., Chursova L.V. Svojstva i naznachenie kleja VK-36RM dlja aviacionnoj tehniki [Properties and glue assignment VK-36RM of aviation engineering] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2013. №8. S. 5–6.
9. Lukina N.F., Dement'eva L.A., Serezhenkov A.A. et al. Adhesive prepregs and composite materials on their bases //Russian J. of General Chemistry. 2011. V. 81. №5. P. 1022–1024.
10. Lukina N.F., Dement'eva L.A., Serezhenkov A.A. i dr. Kleevyje prepregi i kompozicionnye materialy na ih osnove [Glue prepregs and composite materials on their basis] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 53–56.
11. Zhang Zhiye (Zach), Lu Guo-Quan. Pressure-Assisted Low-Temperatuze Sintering of Silver Paste as an Alternative Die-Attach Solution to Soldez Reflow //Trans. Ind. Applicat. 2002. V. 25. №4. P. 279–283.
12. Lukin V.I., Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N., Kucevich K.E., Nishhev K.N. Metod opredelenija prochnosti sceplenija serebrjanogo pokrytija s kremnievoj podlozhkoj s ispol'zovaniem kleja [Method of determination of durability of coupling of silver covering with silicon substrate with glue use] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2014. №6. S. 34–36.