

О. Г. Оспенникова, А. Г. Евгенов, С. В. Неруш, А. Н. Афанасьев-Ходыкин

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ПРИПоеВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОЛУЧЕНИЮ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ПОЛУФАБРИКАТА В ВИДЕ САМОКЛЕЮЩЕЙСЯ ЛЕНТЫ НА ОРГАНИЧЕСКОМ СВЯЗУЮЩЕМ

Исследованы мелкодисперсные (менее 40 мкм) порошки припоев марок ВПр24, ВПр50, ВПр36 и ВПр44 для вакуумной диффузионной пайки, полученные методом атомизации расплава на установке HERMIGA10/100VI применительно к получению высокотехнологичного полуфабриката в виде самоклеющихся лент на органическом связующем. Показано, что полученные при распылении холодным и горячим газом мелкодисперсные порошки имеют низкое содержание кислорода, хорошую смачиваемость и растекаемость в исследованном диапазоне гранулометрического состава и обеспечивают высокую плотность упаковки и минимальное количество органического связующего при изготовлении в виде тонких лент. Пайка с применением таких лент гарантирует высокие прочностные характеристики паяных соединений на уровне 0,8-0,9 от основного металла. *Атомизер; атомизация; аморфизация; диффузионная пайка; припой; гранулы; порошки; распыление; гранулометрический состав; органическое связующее*

В ФГУП «ВИАМ» разработана целая гамма припоев для высокотемпературной вакуумной диффузионной пайки жаропрочных (в том числе нового поколения) сплавов и нержавеющей сталей: ВПр24, ВПр27, ВПр36, ВПр37, ВПр42, ВПр44, ВПр50 и др. Припои находят применение при пайке знаковых отверстий лопаток, блоков сопловых лопаток, дефлекторов, сотовых уплотнительных и пористоволокнистых истираемых материалов. В СССР припои для вакуумной пайки производились методом газоструйного распыления, так как получение их методом распыления вращающегося электрода невозможно из-за высокой хрупкости материала: отдельные марки припоев содержат до 10 % (в сумме) кремния и бора [1]. Получаемые порошки отличались достаточно высоким качеством, однако большой разброс (от 50 до 400 мкм) в ряде случаев создает проблемы с точностью дозировки припоя. Альтернативный процесс – получение порошков размолотом аморфных лент (фрагментов) отличается исключительно высокой трудоемкостью и, следовательно, высокой стоимостью. Отличительной особенностью обоих способов является невозможность использования тонкой (менее 40 мкм) фракции порошка из-за высокого газонасыщения или наволакивания материала мелющего инструмента при развитой поверхности частиц такого размера.

Отдельной проблемой является нанесение порошка припоя на поверхность паяемой дета-

ли. Нанесение припоя в виде пасты или с помощью пропитки порошка органической связкой не всегда может обеспечить требуемую точность дозировки. Это в особенности характерно для пайки деталей с большой площадью и криволинейной поверхностью. Еще в конце 70-х годов прошлого века в ВИАМе была высказана идея получения наиболее технологичных полуфабрикатов припоев и получены первые образцы в виде лент на органическом связующем, которые первоначально помещали между двух слоев полиэтиленовой пленки, удаляемых перед нанесением на паяемую деталь. Такие ленты за счет гарантированной толщины и фиксированного количества связующего обеспечивают высокую точность дозировки, а за счет высокой пластичности – возможность нанесения на практически любые поверхности. Раскрой лент на необходимые фрагменты резкой или вырубкой с помощью пробойника также не представляет проблем. Однако серийное производство таких лент в России до настоящего момента так и не было налажено. Одной из главных проблем при использовании лент на органическом связующем был малый срок хранения из-за потери геометрии по открытым торцам из-за неконтролируемого испарения растворителя (первое поколение лент изготавливалось без клеевого слоя, клейкость обеспечивалась за счет «самоадгезии» частично полимеризованной органической основы). По истечении 1–2 недель по краям лент появляются «фестоны» и утолщения, искажающие геометрию. Кроме того, возмож-

ности газоструйных установок не позволяли получать годного порошка тонкой (менее 40–50 мкм) фракции, а большой разброс гранулометрического состава (50–400 мкм) ограничивал минимальную толщину получаемых лент на уровне 3–4 мм.

В ФГУП «ВИАМ» в 2010 г. введен в эксплуатацию современный атомайзер последнего поколения HERMIGA10/100VI фирмы PSI (Великобритания), имеющий основной рабочий диапазон получаемых гранул 10–100 мкм, ориентированный на серийное производство порошков припоев для высокотемпературной пайки. Сама технология атомизации отличается от классического газоструйного распыления увеличенным соотношением газ/расход металла. Так, для отечественных газоструйных машин диаметр металлопровода, через который осуществлялся слив металла, составлял от 4 до 8 мм при давлении распыления 4–10 бар [2]. При распылении в атомайзере HERMIGA10/100VI разливка металла осуществляется через подогреваемую керамическую трубку диаметром от 1 до 2 мм при давлении распыления 30–70 бар, такие параметры позволяют получать средний размер гранул (параметр  $d_{50}$ ) для припоев на никелевой основе равный 35–45 мкм. Наличие системы подогрева газа за счет увеличения начальной скорости на выходе из форсунки до 2 МАХ обеспечивает получение среднего размера частиц 17–25 мкм. Получение годных порошков такого гранулометрического состава открывает широкие перспективы для производства готовых полуфабрикатов: припоев в виде самоклеющихся лент на органическом связующем. Полученные методом атомизации порошки отличаются высокой однородностью гранулометрического состава, а присутствие дисперсных частиц размером 10–30 мкм обеспечивает высокую плотность упаковки и за счет этого уменьшение количества органического связующего. Кроме того, особотонкие (до 300, а в перспективе и до 100 мкм) ленты смогут заменить аморфные ленты припоев при том, что они могут быть изготовлены из любых, даже не аморфизируемых марок припоев. При получении таких лент разом отпадает еще одна проблема – закрепление таких лент (например, при пайке сотовых конструкций), связанное с опасностью прожога при работе с аморфными лентами при закреплении точечной контактной сваркой на тонколистовом материале.

Настоящая работа посвящена исследованию свойств и структуры наиболее дисперсных по-

рошков припоев на никелевой основе применительно к получению готовых полуфабрикатов в виде лент на органическом связующем.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования приняты порошки припоев на никелевой основе марок ВПр24, ВПр50, ВПр36, ВПр44, предназначенные для пайки жаропрочных сплавов типа ЖС6У (ВПр24), монокристаллических и направленнокристаллизованных (НК) – жаропрочных сплавов (ВПр36, ВПр44) и нержавеющей сталей (ВПр50). Порошки получали распылением в атомайзере HERMIGA10/100VI, оснащенном индукционным плавильным блоком с донным сливом. Шихтовую заготовку для распыления выплавляли в вакуумной плавильной установке УППФ-3М с использованием специальной разливочной оснастки, обеспечивающей получение электродов диаметром 20 и 30 мм, и перед загрузкой подвергали пескоструйной обработке поверхности. Распыление струи металла вели холодным и подогретым до 450 °С газом с использованием соответствующих сменных форсунок.

Гранулометрический состав полученных порошков определяли с помощью виброгрохота Analizzate 3 Spartan (Германия) с комплектом сит 25–200 мкм и штатного газо-динамического сепаратора (классификатора) установки HERMIGA10/100VI, имеющего рабочий диапазон от 1 до 75 мкм при производительности до 50 кг/ч. Первичную калибровку классификатора проводили на оптическом металлографическом комплексе AxioImagerA1 фирмы «CarlZeiss» при увеличениях  $\times 100$  –  $\times 200$  со съемкой изображений при помощи цифровой камеры (3 мегапиксела) и обработкой изображений в программе Vestra. Микроструктуру поверхности и поперечных срезов гранул припоев исследовали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840. Растекаемость и смачиваемость припоев оценивали по ГОСТ 20486-75. Газовый анализ проводили без предварительной дегазации полученных порошков.

Плотность упаковки порошков различного гранулометрического состава оценивали по следующей методике. Мерный стакан объемом 100 мл заполняли ацетоном до отметки 40 мл, взвешивали и устанавливали на вибростол. Далее в стакан засыпали порошок таким образом, чтобы уровень пульпы поднялся до отметки 60 мл, при этом измеряли максимальный уровень жидкости и массу стакана.

На основании полученных данных вычислялись:

- масса используемого порошка:

$$M_{\text{пор}} = Mc_2 - Mc_1,$$

где  $M_{\text{пор}}$  – масса порошка, г;  $Mc_2$  – масса стакана с ацетоном, г;  $Mc_1$  – масса пустого стакана, г;

- объем ацетона, располагающегося в пульпе (в свободных пространствах между частицами порошка):

$$V_{\text{ац}} = 40 - (V_m - 60),$$

где  $V_{\text{ац}}$  – объем ацетона, мл;  $V_m$  – максимальный уровень жидкости, мл;

- относительная пористость порошка припоя, т. е. относительное содержание свободного пространства в наиболее плотной упаковке порошка припоя:

$$P = V_{\text{ац}} / 60 \times 100,$$

где  $P$  – относительная пористость порошка припоя, %;

- удельная пористость порошка припоя, т. е. содержание свободного пространства в наиболее плотной упаковке порошка припоя массой 1 г:

$$P_{\text{уд}} = V_{\text{ац}} / M_{\text{пор}},$$

где  $P_{\text{уд}}$  – удельная пористость порошка припоя мл/г.

Кратковременную прочность ( $\sigma_b$ ,  $\delta$ ) оценивали на паяных образцах при комнатной и повышенной (975 °С для припоя ВПр24, 1000 °С для припоя ВПр36, 1100 °С для припоя ВПр44) температурах: для припоя ВПр50 – на плоских образцах из стали 12Х18Н10Т при нахлесточном соединении, для припоев ВПр24, ВПр36 и ВПр44 – на круглых образцах из сплавов ЖС6У, ЖС26МОНО и ЖС36МОНО соответственно, паяных встык. Для пайки использовали порошок припоя гранулометрическим составом менее 40 мкм, который наносили в виде самоклеющихся лент на органическом связующем, изготовленных по технологии ФГУП «ВИАМ».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Исследование гранулометрического состава и микроструктуры порошков припоев, полученных методом атомизации

Гранулометрический состав, помимо параметров атомизации (давления распыления, избыточного давления над зеркалом расплава, температуры расплава), во многом определяется химическим составом распыляемых материалов:

жидкотекучестью и вязкостью расплава (влияет на расход металла) и его поверхностным натяжением. Для припоев с высоким содержанием аморфизаторов характерно получение более тонких порошков по сравнению с высокотемпературными припоями типа ВПр44. При распылении холодным газом на установке HERMIGA10/100VI средний диаметр ( $d_{50}$ ) частиц для припоя ВПр24 составляет 42–30 мкм, а для припоя ВПр44 65–50 мкм. Распыление горячим газом позволяет получить  $d_{50}$  для припоя ВПр24 равным 18 и даже 13 мкм при минимальном расходе металла при атомизации. Для высокотемпературных припоев (ВПр36, ВПр44) получить средний диаметр частиц менее 33 мкм не удалось, что также обусловлено склонностью данных материалов к образованию сателлитов.

Фракционный состав порошка припоя ВПр24 в зависимости от режима распыления приведен на рис. 1. Основная фракция при распылении холодным газом 20–63 мкм. При переходе на распыление горячим газом уменьшение среднего диаметра частиц происходит главным образом за счет фракции 10–20 мкм (ее содержание увеличивается с 21,5 до 34,2 %) при пропорциональных изменениях по остальным фракциям. Как видно из рис. 1, процент пылевой фракции (менее 10 мкм) при распылении горячим газом увеличивается незначительно.

Гранулы припоев ВПр36 и ВПр44 имеют выраженное дендритное строение (рис. 2, а) практически во всем диапазоне гранулометрического состава. В соответствии с данными работы [3] по величине дендритного параметра скорость охлаждения при кристаллизации для гранул размером 50–100 мкм можно оценить как  $10^5$  °С, для более тонких частиц, очевидно, достигается значительно более высокая скорость охлаждения. Гранулы размером менее 4–6 мкм находятся в аморфном состоянии.

Для припоев ВПр24 и ВПр50 с высоким содержанием элементов-аморфизаторов (кремния и бора) зачатки дендритного строения наблюдаются на гранулах размером более 25–40 мкм. Более тонкие гранулы полностью или частично аморфизированы, имеют форму практически идеальной сферы (рис. 2, б).

Для гранул этих сплавов характерно малое количество сателлитов, что, очевидно, связано с высокой температурой стеклования данных сплавов [4] и, как следствие, меньшим временем затвердевания гранул, по сравнению с гранулами трудноаморфизируемых припоев ВПр36 и ВПр44.

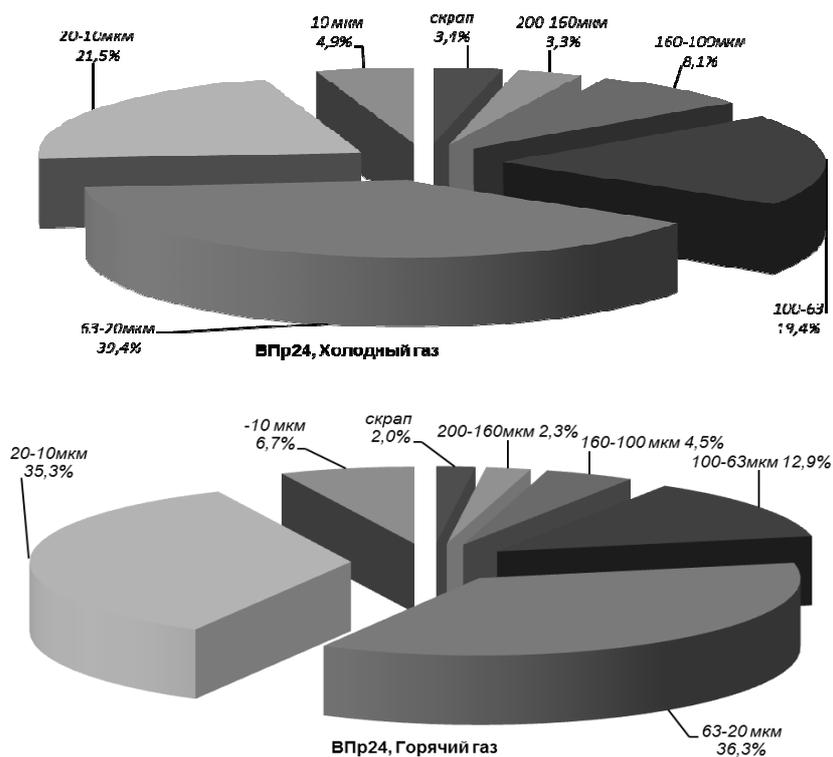


Рис. 1. Средний фракционный состав порошков припоя ВПр24 при распылении холодным и горячим газом

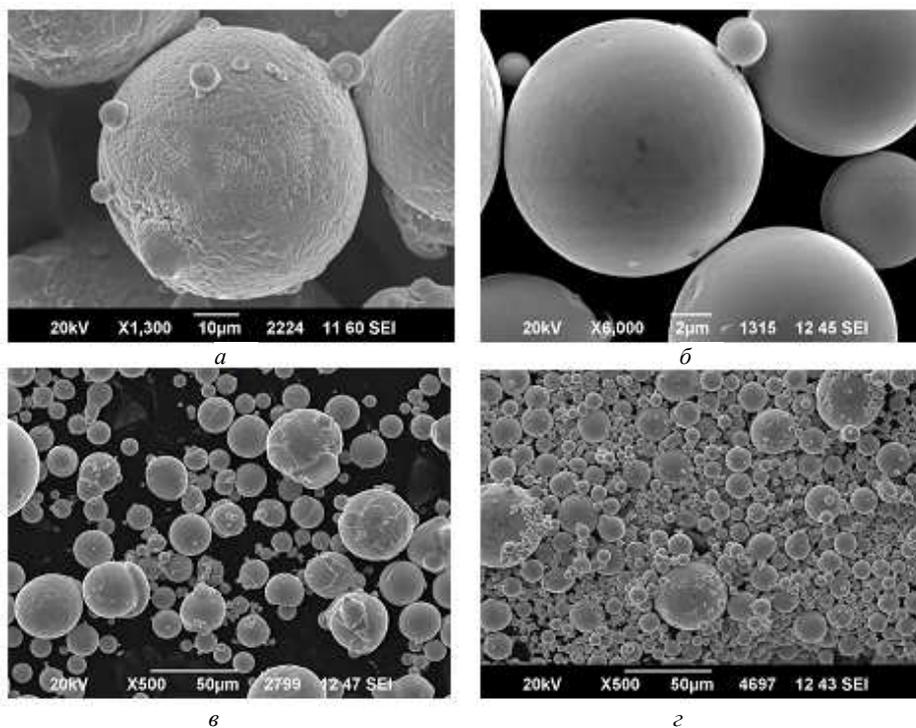


Рис. 2. Микроструктура гранул припоев ВПр36 (а), ВПр50 (б), ВПр24, распыление холодным (в) и горячим (г) газом

Количество дефектных гранул (сателлитов, деформированных гранул и т.п.) увеличивается с увеличением размеров частиц.

Для гранул этих сплавов характерно малое количество сателлитов, что, очевидно, связано с высокой температурой стеклования данных сплавов [4] и, как следствие, меньшим временем затвердевания гранул, по сравнению с гранулами трудноаморфизируемых припоев ВПр36 и ВПр44. Количество дефектных гранул (сателлитов, деформированных гранул и т. п.) увеличивается с увеличением размеров частиц.

Распыление горячим (~450 °С) газом приводит, помимо уменьшения среднего размера частиц, к уменьшению количества дефектных гранул (рис. 2, в) по сравнению с распылением холодным газом (рис. 2, з), что связано, очевидно, с большей начальной скоростью газового потока на выходе из форсунки (до 2 МАХ) и большим диаметром образующегося факела распыляемого металла, что определяет низкую вероятность соударения гранул во время затвердевания (на вылете). Существенных различий в структуре поверхности между гранулами, распыленными холодным и горячим газом не отмечено: максимальный диаметр аморфизированных частиц, чистота поверхности, дендритный параметр крупных гранул остаются без изменений.

Содержание кислорода и азота в порошках исследованных припоев практически не зависит от режимов распыления и определяется в основном химическим составом припоев. Отмечена тенденция к незначительному (на 0,001–0,002 %) росту содержания кислорода при распылении горячим газом. Содержание азота несколько выше (до 0,005 %) для высокохромистых припоев, что объясняется его большим количеством в исходной шихтовой заготовке.

Исследование влияния фракционного состава на содержание кислорода в порошках, проведенное на примере припоя ВПр24, показало, что в диапазоне 20–100 мкм оно изменяется незначительно (от 0,004 % для фракции 100–80 до 0,006 % для фракции 40–20 мкм). Для фракции 0–20 мкм содержание кислорода составляет 0,013 %, однако, следует понимать, что в данном случае мы имеем дело не столько с растворенным в металле, а с адсорбированным поверхностью частиц порошка кислородом. Для определения истинного содержания кислорода в тонких порошках необходима разработка специальной методики проведения газового анализа, которая бы позволила разделить кислород,

содержащийся в окислах от адсорбированного поверхностью гранул. В целом надо отметить, что даже на таких тонких порошках получено весьма низкое содержание кислорода, что обусловлено получением наиболее тонких частиц порошка в полностью или частично аморфизированном виде и слабым развитием поверхности в условиях сверхбыстрой кристаллизации.

#### **Исследование технологических характеристик порошков припоев применительно к получению полуфабрикатов виде лент на органическом связующем**

Исследование основных технологических характеристик припоев (смачиваемости и растекаемости) проводили применительно к тонким (менее 40 мкм) порошкам, полученных методом атомизации. Предварительно порошки разделяли на фракции 40–20, 20–10 и менее 10 мкм, а также исследовали порошок фракции 0–40 без деления. Для сравнения параллельно оценивали смачиваемость и растекаемость на фракции 200–100 мкм.

Для фракций 40–20 и 20–10 мкм растекаемость и смачиваемость не отличается от показателей для фракции 100–200 мкм. На поверхности припоев не обнаружено шлаковых и окисных включений.

Гранулы размером 0–10 мкм для припоев ВПр24, ВПр36, ВПр50 при стандартных температурных режимах спекаются, но не сплавляются. Для обеспечения сплавления температуру пайки пришлось увеличить на 10–15 °С для припоев ВПр36, ВПр50 и на 20 °С для припоя ВПр24, после чего была достигнута хорошая растекаемость и смачиваемость припоев, соответствующая фракции 100–200 мкм. Различие в сплавлении гранул тонких фракций обусловлено развитой поверхностью и протекающими в вакууме процессами ее самоочистки, т. е. расконсервации под тонкой окисной пленкой основного материала за счет начала испарения элементов – депрессантов, скорость которого определяется в первую очередь химическим составом и температурой плавления припоев. Так, для высокотемпературного припоя ВПр44 удовлетворительная растекаемость и смачиваемость для фракции 0–10 мкм обеспечиваются уже при стандартном температурном режиме пайки.

Наличие дисперсных (менее 10 мкм) частиц во фракции 0–40 мкм не оказывает какого-либо влияния на характеристики смачиваемости и растекаемости, так как они равномерно рас-

пределены в объеме вместе с более крупными гранулами, которые инициируют сплавление частиц в процессе нагрева.

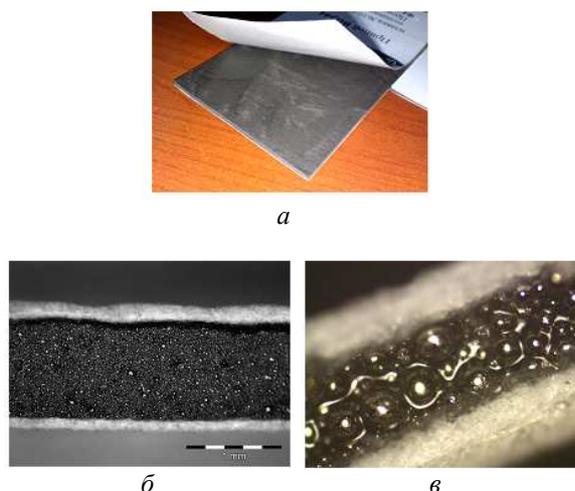
Для определения минимально необходимого количества органического связующего и выбора оптимального гранулометрического состава используемых порошков исследовали плотность упаковки гранул в соответствии с классами порошков (для припоев, полученных на установке HERMIGA10/100VI введены следующие классы гранулометрического состава: 1-й – 10–40; 2-й – 40–100; 3-й – 10–200 мкм;). Для сравнения исследовали плотность упаковки порошка, полученного на отечественной установке газоструйного распыления гранулометрическим составом 50–400 мкм (табл. 1).

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что по сравнению с классическим газоструйным распылением порошки, полученные по технологии атомизации, соответствующие 1-му и 3-му классу, обеспечивают наибольшую плотность упаковки, а следовательно, минимальное количество необходимого органического связующего.

Вместе с использованием более тонких порошков при производстве лент была кардинально изменена технология их получения: для обеспечения длительных сроков хранения (не менее 12 месяцев) было решено перейти на прокатку лент в полностью полимеризованном состоянии с нанесением на поверхность клеевого слоя. Для этой цели были исследованы различные композиции органических материалов для собственно органического связующего и клеевого слоя, которые позволили гарантировать полное удаление их при нагреве до температур пайки и обеспечить отсутствие зольного остатка в структуре паяного шва.

Внешний вид и структура полученных лент представлена на рис. 3.

Как видно, применение тонких порошков позволяет получать однородную по сечению, плотную структуру лент, а технология изготовления металлорганической массы обеспечивает равномерное распределение связующего и отсутствие пор (рис. 3, б), что гарантирует высокую точность дозировки припоя. Для сравнения были изготовлены аналогичные ленты без использования порошка тонкой фракции (менее 40 мкм). Это привело к появлению (при прокатке) в отдельных участках лент слоистости с выраженными прослойками органической связки (рис. 3, в).



**Рис. 3.** Внешний вид (а) и структура лент припоев на органическом связующем с клеевым слоем, изготовленных из порошков фракций 10–40 (б, х50) и 50–200 мкм (в, х100)

Полученные данные имеют важное значение: применение тонких порошков, традиционно считавшихся непригодными к пайке, открывает новые перспективы для упрощения нанесения припоев и повышения точности их дозировки. Дисперсные гранулы обеспечивают высокую плотность упаковки порошков и полноту заполнения зазоров. Для наиболее перспективного в серийном производстве полуфабриката припоя в виде самоклеющихся лент на органическом связующем применение дисперсных (менее 40 мкм) порошков позволит получать особо тонкие ленты толщиной до 100 мкм, получение которых на существующих порошках невозможно из-за малой прочности органического связующего. Для наиболее перспективного в серийном производстве полуфабриката припоя в виде самоклеющихся лент на органическом связующем применение дисперсных (менее 40 мкм) порошков позволит получать особо тонкие ленты толщиной до 100 мкм, получение которых на существующих порошках невозможно из-за малой прочности органического связующего.

Для наиболее перспективного в серийном производстве полуфабриката припоя в виде самоклеющихся лент на органическом связующем применение дисперсных (менее 40 мкм) порошков позволит получать особо тонкие ленты толщиной до 100 мкм, получение которых на существующих порошках невозможно из-за малой прочности органического связующего.

Таблица 1

**Плотность упаковки порошка припоя ВПр50**

Наименование показателя	Размерность	Показатели			
		1	2	3	4
Класс порошка припоя	–	1	2	3	4
Фракционный состав порошка	мкм	0-40	40-100	10-200	50-400
Масса используемого порошка $M_{пор}$	г	310,3	288,3	305,7	309
Объем ацетона в пульпе $V_{acc}$	мл	18	23	20	30
Относительная пористость порошка $P$	%	30,0	38,3	33,3	42,86
Удельная пористость порошка $P_{уд}$	мл/г	0,058	0,079	0,065	0,097

Таблица 2

**Кратковременная прочность паяных соединений сплавов ЖС6У и ЖС26**

Сплав (о.м.)	Припой	$T_{исп.}$ °С	$\sigma_{в.п.соед.}$ МПа	$\sigma_{в.о.м.}$ МПа*	$\sigma_{в.п.соед.}/\sigma_{в.о.м.}$
ЖС6У	ВПр24	975	559	578	0,97
ЖС26	ВПр36	1000	539; 618; 648	647	0,83–1,0
ЖС36	ВПр44	1000	666, 705	844	0,79–0,84

\* – паспортная характеристика

**Испытания механических свойств паяных соединений, выполненных с помощью лент на органическом связующем**

Исследование механических свойств паяных соединений, пайка которых проводилась порошками припоев ВПр24, ВПр50, ВПр36 и ВПр44 в виде лент на органическом связующем толщиной 300 мкм, изготовленных из порошков 1 класса (10–40 мкм) показало полное соответствие их пайке более крупными фракциями порошков: для припоев ВПр24 и ВПр36 предел кратковременной прочности паяного соединения составил соответственно 0,97 и 0,83–1,0 от основного металла соответственно при температурах испытания 975 °С для припоя ВПр24 и 1000 °С для припоя ВПр36 при стыковом соединении. Для припоя ВПр44 также характерен высокий уровень кратковременной прочности: 0,81 от основного материала при температуре испытаний 1100 °С. Паяное соединение, выполненное припоем ВПр50, при нахлесточном соединении выдержало испытания при температурах 400, 650 и 800 °С без разрушения (разрушение по основному материалу на всех образцах, рис. 4).

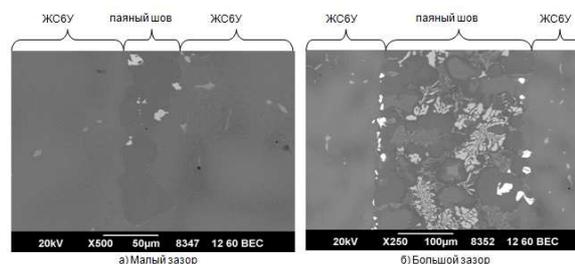
Исследование структуры паяных соединений (рис. 5), выполненных лентами припоя на органическом связующем не выявило наличие каких-либо артефактов, связанных с неполным выгоранием органической составляющей лент.

Как видно из приведенных данных новый полуфабрикат – ленты порошковых припоев на органической связке обеспечивают высокий

уровень прочности паяных соединений, не уступают ранее использованным полуфабрикатам припоев и превосходят их по технологичности использования (табл. 2).



**Рис. 4.** Внешний вид образцов из стали 12Х18Н10Т, паяных припоем ВПр50 после испытания при 400, 650 и 800 °С



**Рис. 5.** Микроструктура паяного соединения сплава ЖС6У, выполненного лентой порошка припоя ВПр24 на органической связке

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что метод атомизации расплава позволяет получать пригодные для пайки порошки припоев гранулометрическим составом менее 40 мкм при распылении холодным и горячим газом, содержание кислорода в которых не превышает 0,018 % даже для частиц размером менее 10 мкм.

Распыление подогретым до 450 °С газом способствует значительному измельчению порошков и уменьшает количество дефектных гранул по сравнению с распылением холодным газом. Уменьшение среднего размера частиц при переходе на распыление горячим газом происходит главным образом за счет увеличения числа гранул фракции 10–20 мкм, а количество пылевой фракции (менее 10 мкм) увеличивается незначительно.

Смачиваемость и растекаемость порошков припоев ВПр24, ВПр50 и ВПр36 размером 10–40 мкм не отличается от более крупных фракций; для сплавания гранул размером менее 10 мкм требуется увеличение температуры пайки на 10–20 °С, что связано с различным протеканием процессов расконсервации тонкой окисной пленки на поверхности частиц в зависимости от химического состава и температуры пайки разных припоев. Присутствие в порошке припоя фракции 0–40 мкм частиц размером менее 10 мкм не оказывает влияния на смачиваемость и растекаемость припоев.

Паяные соединения, выполненные припоями в виде самоклеющихся лент на органическом связующем, содержащих мелкодисперсные гранулы (менее 40 мкм, полученные на установке HERMIGA10/100VI), имеют высокий уровень кратковременной прочности при повышенных температурах. Качество пайки такими лентами не уступает ранее использованным полуфабрикатам припоев, а по технологичности использования самоклеющихся лент припоев значительно превосходят их и могут быть рекомендованы для пайки ответственных деталей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности производства жаропрочных порошковых припоев / П. С. Анучин [и др.] // *Металлургия гранул: сб. ст.*, 1983. Вып. 1. С. 154–159
2. **Аношкин Н. Ф., Ходкин В. И., Рытов Н. Н.** Разработка и внедрение технологии производства гранул высокотемпературных припоев методом струйного распыления для пайки деталей из никелевых сплавов // *Металлургия гранул: сб. ст.*, 1983. Вып. 1. С. 127–134.
3. **Добаткин В. И.** Роль кинетических и термодинамических факторов при кристаллизации гранул // *Металлургия гранул: сб. ст.*, 1983. Вып. 1. С. 23–33.
4. **Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимимото К.** Аморфные металлы. М.: *Металлургия*, 1987. 327 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Оспенникова Ольга Геннадьевна**, зам. ген. дир. ФГУП «ВИАМ». Дипл. спец. (МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского, 1988). Канд. техн. наук. Иссл. в обл. жаропрочн. литейн. и деформируемых сплавов и стали, защитн. покрытий для деталей ГТД.

**Евгенов Александр Геннадьевич**, дипл. спец. (МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2000). Канд. техн. наук. Иссл. в обл. ГИП жаропрочн. и конструкционных материалов, металлургии специальных сплавов и порошковых материалов.

**Неруш Святослав Васильевич**, дипл. спец. (МИСиС, 2010). Иссл. в обл. ГИП жаропрочн. и конструкционных материалов, металлургии специальных сплавов и порошковых материалов.

**Афанасьев-Ходькин Александр Николаевич**, дипл. спец. (МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского, 1984). Иссл. в обл. пайки жаропрочн., конструкц. материалов, пайки изделий спец. назначения, ремонта деталей из жаропрочных сплавов пайкой.