



УДК 621.791.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-2-2

**ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ ПОРИСТО-ВОЛОКНИСТОГО  
МАТЕРИАЛА ИЗ СПЛАВА ТИПА «ФЕХРАЛЬ»  
ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД**

А.Н. Афанасьев-Ходыкин

В.С. Рыльников

*кандидат технических наук*

Д.П. Фарафонов

**Январь 2014**

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 621.791.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-2-2

*А.Н. Афанасьев-Ходыкин, В.С. Рыльников, Д.П. Фарафонов*

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ ПОРИСТО-ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА ИЗ СПЛАВА ТИПА «ФЕХРАЛЬ» ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД**

*Приведены сведения о новом пористо-волокнистом уплотнительном материале для уплотнения проточной части газотурбинного двигателя. Освещены особенности его пайки. Приведены результаты опробования различных припоев для пайки пористо-волокнистого уплотнительного материала, а также основные сведения о новом композиционном припое на основе железа, разработанном специально для пайки пористо-волокнистого уплотнительного материала из сплава типа «фехраль».*

**Ключевые слова:** *пайка, припой, композиционный припой, уплотнение, газотурбинный двигатель.*

*A.N. Afanasiev-Khodykin, V.S. Rylnikov, D.P. Farafonov*

## **SOLDERING TECHNOLOGY OF POROUS FIBROUS MATERIAL OF THE «FEHRAL»-TYPE ALLOY FOR SEALING OF THE FLOW PART OF GTE**

*This article contains information about a new porous fibrous sealing material for sealing the flow of the gas turbine engine. Highlight features of its brazing. The results of testing various solders for the brazing of porous fibrous sealant. Provides basic information about the new composite solder iron base specifically designed for brazing porous fibrous sealant type alloy «fehral».*

**Key words:** *brazing, composite solder, seal, turbine engine.*

Одним из путей повышения КПД двигателей является создание эффективной системы уплотнения проточных трактов [1–7]. Для этого необходимо минимизировать радиальный зазор между торцами лопаток и корпусом двигателя. При этом в процессе работы необходимо исключить касание лопаток с корпусом турбины при условии высоких температур газового потока, приводящих к деформации корпуса, а также воздействию значительных центробежных сил, испытываемых рабочими лопатками и вызы-

вающих их вытягивание. Одним из способов реализации данной задачи является установка на корпусе двигателя уплотнительных элементов, одним из обязательных свойств которых является их высокая истираемость, уменьшающая износ торцевой части лопатки. Перспективным материалом для изготовления уплотнительных элементов ГТД является новый пористо-волокнистый материал (ПВМ) из сплава типа «фехраль». Данный материал обладает очень низкой плотностью, высокой истираемостью и, при наличии защитного покрытия, работоспособен до температур 1100°C.

Волокна сплава типа «фехраль», являющиеся основой ПВМ, сплетаясь между собой, образуют сложную систему капиллярных зазоров переменной величины. Поэтому при пайке данный материал активно вбирает в себя расплав припоя, что приводит к потере его пористости и резкому снижению эксплуатационных характеристик. Для исключения этого процесса необходимо, чтобы припой в процессе пайки находился в твердожидком состоянии, когда жидкость за счет капиллярных сил удерживается в месте укладки нерасплавившимися частицами [8–10]. Это можно обеспечить путем применения композиционного припоя или припоя с широким интервалом плавления.

Опробованы никелевые жаропрочные припои ВПр36, ВПр44 и ВПр37 [11–13]. Выбор припоев определялся работоспособностью паяных соединений при температуре 1100°C. Исследования микрошлифов паяных соединений ПВМ, выполненных различными припоями, показали наличие эрозийного повреждения волокон уплотнительного материала припоями ВПр44 и ВПр37. Припой ВПр36 показал полное отсутствие эрозийного повреждения волокон из сплава типа «фехраль». Анализ структур соединений, выполненных припоем ВПр36, показал, что пайка произошла в отдельных местах касания волокон с подложкой, при этом величина проникновения припоя в ПВМ достигала 1 мм. Микроструктура паяного соединения, выполненного припоем ВПр36, приведена на рис. 1. На подложке практически отсутствует слой расплавленного припоя. Припой находится в теле ПВМ, соединяя волокна ПВМ.

С целью уменьшения капиллярного проникновения припоя в пористый материал применялись порошки наполнителей, позволяющие дозировать количество жидкой фазы припоя при формировании соединений. В качестве порошков наполнителей использовались порошки жаропрочных никелевых сплавов ЭП975 и ЖС6У. Для определения необходимого содержания наполнителя в композиционном припое изготовлены смеси порошков припоя ВПр36 и наполнителя. Исследование микроструктур паяных соединений позволило выбрать оптимальное содержание наполнителя в припое, эффективно подавляющее процесс пропитки ПВМ, способствуя удержанию жидкой фазы припоя

вблизи подложки. Характерная микроструктура паяного соединения ПВМ, полученного при использовании такого композиционного припоя, приведена на рис. 2. На границе ПВМ с подложкой находится слой расплавленного припоя с наполнителем толщиной от 200 до 400 мкм. Этот слой имеет плотный контакт с подложкой и с прилегающими волокнами ПВМ. Облуживание волокон ПВМ выше припоя практически отсутствует.



Рисунок 1. Микроструктура ( $\times 100$ ) паяного соединения ПВМ, выполненного припоем ВПр36 при температуре пайки  $1260^{\circ}\text{C}$

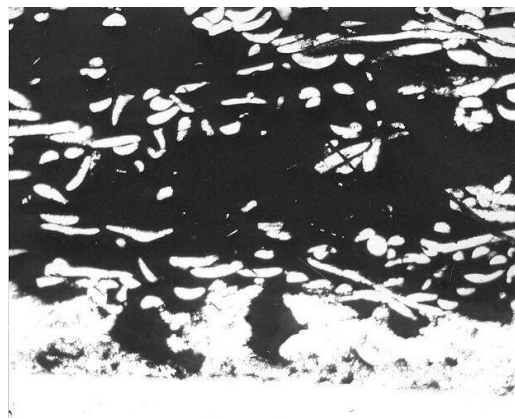


Рисунок 2. Микроструктура ( $\times 100$ ) паяного соединения ПВМ, выполненного композиционным припоем на основе припоя ВПр36

Вследствие недостаточной жаростойкости пористо-волокнутого материала на основе Fe–Cr–Al–Y при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$  его волокна необходимо защищать жаростойким покрытием. Единственным покрытием, которое возможно нанести на волокна пористого материала по всей его высоте, является покрытие на основе SiC–SiO<sub>2</sub>. При длительных испытаниях на жаростойкость обнаружено, что при столь высоких температурах ( $1100^{\circ}\text{C}$ ) происходит взаимодействие припоя с покрытием, в результате чего нарушается целостность покрытия и происходит сквозное окисление волокон на границах облуживания. По-видимому, это связано с наличием в припое бора, который способствует нарушению целостности покрытия. В результате при длительных испытаниях происходит выгорание границы между пористо-волокнустым материалом и слоем припоя. Особенно отчетливо данная картина наблюдается при теплосменных режимах испытаний, имитирующих запуск и остановку двигателя.

Для решения данной проблемы необходимо исключить бор из состава припоя, а так как большинство никелевых жаропрочных припоев содержат в своем составе бор в качестве основного депрессанта, было принято решение о разработке нового припоя на основе железа.

При разработке припоя учитывались следующие требования:

- температура пайки должна лежать в интервале 1200–1280°C;
- максимально большой интервал температур пайки (интервал температур, при котором количество жидкой фазы остается постоянным).

В результате исследований найден состав припоя, обладающий следующими технологическими характеристиками:

- интервал плавления 1180–1280°C;
- интервал температур пайки 1210–1240°C;
- количество жидкой составляющей в интервале температур пайки – около 40%.

Столь значительный интервал плавления припоя позволяет уменьшить количество необходимого наполнителя для подавления капиллярного проникновения припоя в ПВМ. Это достигается тем, что пайка производится при температуре, лежащей в пределах интервала плавления, когда припой находится в твердожидком состоянии. При этом твердые частицы припоя будут надежно удерживать жидкость вблизи подложки.

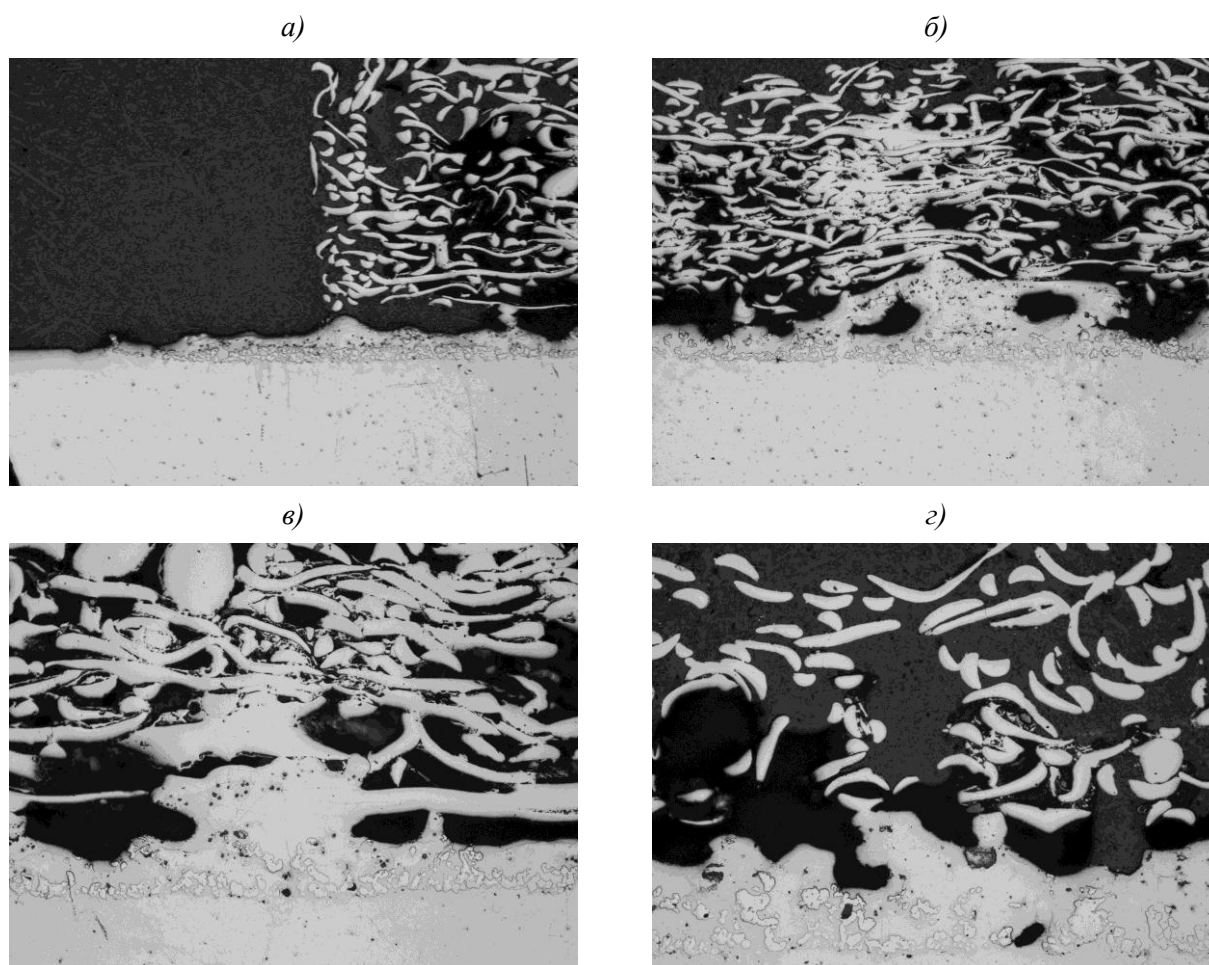


Рисунок 3. Микроструктура (а, б –  $\times 50$ ; в, г –  $\times 100$ ) паяного соединения ПВМ, выполненного опытным припоем при температуре 1210–1220°C

Для определения оптимальной температуры пайки исследованы микрошлифы паяных соединений ПВМ, полученных с использованием нового припоя на железной основе при температурах пайки 1210–1220 и 1230–1240°C. Анализ микроструктуры паяных соединений показал, что оптимальное количество жидкости новый припой на железной основе образует при температуре пайки 1210–1220°C (рис. 3). Увеличение температуры пайки до 1230–1240°C вызывает эрозию припоем материала подложки и пропитку припоем пористого материала (рис. 4).

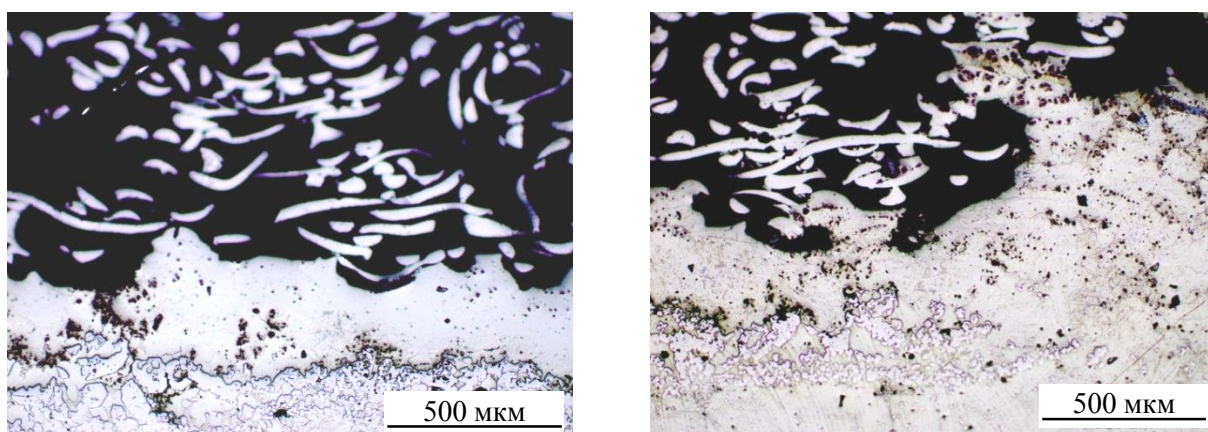


Рисунок 4. Микроструктура паяного соединения ПВМ, выполненного опытным припоем при температуре 1230–1240°C

На рис. 3, *a–в* видна ровная граница подложки из сплава ВКНА-1ВР, в то время как содержание припоя на разных участках подложки разное, что свидетельствует об отсутствии эрозии материала подложки. Отсутствие эрозии припоем волокон наиболее заметно на рис. 3, *г*, где в месте контакта с припоем не видно изменения формы волокна. Припой смачивает только те волокна, которые касаются его, и проникает внутрь пористого материала на величину не более 300 мкм.

На рис. 4 по неровной границе припоя с подложкой видно, что идет процесс эрозии припоем подложки. Эрозия способствует увеличению содержания жидкой фазы. При этом припой активно проникает в пористый материал на величину до 2500 мкм. Также следует отметить, что даже при таком значительном избытке жидкой фазы растворения волокон ПВМ не происходит.

Длительные испытания на жаростойкость паяных соединений ПВМ с защитным покрытием на основе SiC–SiO<sub>2</sub> показали полное отсутствие взаимодействия припоя с

покрытием и работоспособность паяных соединений без появления видимых очагов разрушения свыше 100 ч [14].

Применение серийных припоев для пайки ПВМ не позволило получить качественного паяного соединения ПВМ с подложкой из-за значительной пропитки ПВМ припоем. Использование композиционного припоя с наполнителем позволило решить данную проблему за счет удержания жидкости вблизи подложки твердыми частицами наполнителя. Но наличие бора в припое привело к нарушению целостности защитного покрытия волокон на основе SiC–SiO<sub>2</sub>, что вызвало выгорание волокон на границе с припоем.

Решить обе эти проблемы позволила разработка нового припоя на основе железа, имеющего значительный интервал плавления и не имеющего в своем составе бора. Определен интервал температур пайки, обеспечивающий проникновение припоя в ПВМ на величину не более 300 мкм. Длительные испытания при температуре 1100°C подтвердили работоспособность припоя в контакте с покрытием на основе SiC–SiO<sub>2</sub>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–35.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
4. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова 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. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. М.: МИСИС. 2001. 632 с.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии». С. 13–19.

7. Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Красиков М.И. Исследование ремонтной технологии исправления дефектов паяных соединений топливных коллекторов //Труды ВИАМ. 2013. №12. Ст. 02 (viam-works.ru).
8. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Вопросы теории и технологии пайки. М.: Изд-во Саратовского ун-та. 1974. 248 с.
9. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Пайка металлов. М.: Машиностроение. 1967. 368 с.
10. Хорунов В.Ф., Максимова С.В. Пайка жаропрочных сплавов на современном этапе //Сварочное производство. 2010. №10. С. 24–27.
11. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Особенности получения паяных соединений из сплава ЖС36 //Технология машиностроения. 2010. №5. С. 21–25.
12. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Орехов Н.Г. Особенности пайки монокристаллических отливок из сплава ЖС32 //Сварочное производство. 2012. №5. С. 24–30.
13. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии». С. 79–87.
14. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Р.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.

#### References list

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologiy ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic approaches to the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 7–17.
2. Ospennikova O.G. Strategiya razvitiya zharoprochnykh splavov i staley spetsial'nogo naznacheniya, zaschitnykh i teplozaschitnykh pokrytiy [Development strategy of heat-resistant alloys and special-purpose steels, protective and thermal-protective coatings] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 19–35.
3. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Zharostoykie i teplozaschitnye pokrytiya dlya lopatok turbiny vysokogo davleniya perspektivnykh GTD [Heat-resistant and thermal-protective coatings for turbine blades of high pressure perspective GTD] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 36–40.

- coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTEs] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 60–70.
4. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie protsessa napravlennoy kristallizatsii lopatok GTD iz zharoprochnykh splavov s monokristallicheskoj i kompozitsionnoj strukturoj [Development of directional solidification process in the GTE blades made of heat-resistant alloys with single crystal and composite structure] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
  5. Kablov E.N. Liteye lopatki gazoturbinnyykh dvigateley [Cast blades of gas-turbine engines]. M.: MISIS. 2001. 632 s.
  6. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlya vysokotepλονagruzhennykh detaley gazoturbinnyykh dvigateley [Materials for highly thermal-loaded parts of gas-turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. 2011. Spets. vyp. «Perspektivnye konstruktsionnye materialy i tehnologii». S. 13–19.
  7. Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N., Krasikov M.I. Issledovanie remontnoy tehnologii ispravleniya defektov payanykh soedineniy toplivnykh kollektorov [Study of repair technology to correct the defects of soldered joints in fuel manifolds] //Trudy VIAM. 2013. №12. St. 02 (viam-works.ru).
  8. Lashko N.F., Lashko S.V. Voprosy teorii i tehnologii payki [Theoretical and practical issues of soldering]. M.: Izd-vo Saratovskogo un-ta. 1974. 248 s.
  9. Lashko N.F., Lashko S.V. Payka metallov [Soldering metals]. M.: Mashinostroenie. 1967. 368 s.
  10. Horunov V.F., Maksimova S.V. Payka zharoprochnykh splavov na sovremennom etape [Soldering of heat-resistant alloys at the current stage] //Svarochnoe proizvodstvo. 2010. №10. S. 24–27.
  11. Lukin V.I., Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N. Osobennosti polucheniya payanykh soedineniy iz splava ZhS36 [Peculiarities of soldered joints of ZhS36 alloy] //Tehnologiya mashinostroeniya. 2010. №5. S. 21–25.
  12. Lukin V.I., Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N., Orehov N.G. Osobennosti payki monokristallicheskiykh otlivok iz splava ZhS32 [Peculiarities of ZhS 32 alloy single crystal castings soldering] //Svarochnoe proizvodstvo. 2012. №5. S. 24–30.
  13. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ryl'nikov V.S., Afanas'ev-Hodykin A.N. Issledovanie melkodispersnykh poroshkov pripoev dlya diffuzionnoy vakuumnoy payki, poluchennykh metodom atomizatsii rasplava [Research of solder fine powders for diffusion vacuum soldering, obtained by melt atomization] //Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.

«Mashinostroenie». 2011. Spets. vyp. «Perspektivnye konstruktsionnye materialy i tehnologii». S. 79–87.

14. Shmotin Yu.N., Starkov R.Yu., Danilov R.V., Ospennikova O.G., Lomborg B.S. Nove materialy dlya perspektivnogo dvigatelya OAO «NPO „Saturn”» [New materials for advanced engine of JSC NPO SATURN] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 6–8.