

УДК 621.791.36:537.523.5621.3.032

doi: 10.18698/0536-1044-2023-2-30-39

# Структура и свойства паяных соединений высоколегированных никелевых сплавов, полученных с помощью дугового нагрева в вакууме

**В.М. Неровный, А.В. Коновалов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Structure and Properties of Soldered Joints of the High-Alloyed Nickel Alloys Obtained by Arc Heating in the Vacuum

**V.M. Nerovniy, A.V. Kononov**

Bauman Moscow State Technical University

Ремонт лопаток, выполненных из литейных высокожаропрочных никелевых сплавов с объемным содержанием  $\gamma'$ -фазы 50...65 % и более, сваркой плавлением и наплавкой практически не приводит к положительным результатам, и только при использовании специальных приемов иногда удается получить восстановленный участок, удовлетворяющий условиям эксплуатации лопатки. Поэтому для ремонта лопаток соплового агрегата, створок регулируемого сопла и других деталей горячего тракта газовых турбин ведущие зарубежные и отечественные предприятия чаще всего применяют высокотемпературную пайку в вакууме с общим нагревом. Повысить работоспособность неразъемных соединений (особенно малоразмерных) можно высокотемпературной пайкой при минимально возможном термическом воздействии на основной металл путем локального нагрева в вакууме дуговым разрядом с полым катодом. Дуговая пайка в вакууме с подачей порошковых композиционных припоев в наибольшей степени сочетает достоинства способов наплавки и высокотемпературной пайки с общим нагревом. Результаты металлографических исследований и механических испытаний паяных соединений, полученных дуговой пайкой в вакууме порошковыми композиционными припоями на образцах с имитацией поверхностных дефектов, показали, что их работоспособность выше, чем у соединений, созданных высокотемпературной пайкой в вакууме с общим нагревом.

**Ключевые слова:** высоколегированные никелевые сплавы, дуговая пайка в вакууме, сопловые лопатки, поверхностные дефекты, порошковый композиционный припой, механические свойства

Repair of blades made of the cast high-temperature nickel alloys with the volume content of  $\gamma'$ -phase of 50...65% and more by fusion and built-up welding practically leads to no results. Only introduction of special methods in certain cases provides restoration of a section satisfying the blade operation conditions. Therefore, the leading foreign and domestic enterprises mainly use high-temperature soldering in vacuum with general heating to repair blades of the nozzle unit, flaps of the adjustable nozzle and other parts of the gas turbine hot pass. It becomes possible to increase performance of the permanent joints (especially the small ones) by high-temperature soldering with the lowest acceptable thermal effect on the base metal through local heating in vacuum by the arc discharge with the hollow cathode. Arc soldering in vacuum with supply of the powder composite solders to the greatest extent

combines advantages of built-up welding and high-temperature soldering with the general heating. Results of metallographic studies and mechanical tests of the solder joints obtained by arc soldering in vacuum with powder composite solders on samples with imitation of the surface defects showed higher performance compared to that for joints created by high-temperature soldering in vacuum with general heating.

**Keywords:** high-alloy nickel alloys, vacuum arc soldering, nozzle blades, surface defects, composite solder powder, mechanical properties

Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе применяют для изготовления лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), используемых в авиационной технике, судостроении и энергетическом машиностроении. Лопатки в основном выполняют литьем по выплавляемым моделям, при этом, как правило, образуются различные дефекты. Вместе с тем технология точного литья достаточно сложная и трудоемкая, что обуславливает относительно высокий процент брака при изготовлении изделий [1, 2].

Отливки лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов с объемным содержанием  $\gamma'$ -фазы  $g = 50...65\%$  (ЭП539ЛМ, ВЖЛ12У, ЖС6К, ЖС6У-ВИ, ЖС26, ЧС70, ЧС88) часто имеют литейные поверхностные дефекты — трещины, поры, рыхлоты, засоры и др. Трещины в основном появляются на краях конструктивных элементов вследствие возникновения напряжений при охлаждении деталей. Раковины, поры и пористость образуются как на развитых поверхностях детали, так и в ее галтельной части. Трудно поддающимися исправлению дефектами могут служить рыхлоты на развитой поверхности и в галтелях.

Жесткие требования к качеству поверхности отливок, не допускающие даже единичных поверхностных дефектов глубиной 0,2...0,4 мм и площадью более 1...2 мм<sup>2</sup>, приводят к довольно высокому уровню их отбраковки, который в некоторых случаях может превышать 40 % [1, 3].

Замена в газовых турбинах (ГТ) поврежденных лопаток на новые приводит к значительным материальным и производственным затратам. Ремонт поверхностей лопаток ГТ для продления ресурса как при эксплуатации, так и при изготовлении является одной из самых актуальных задач современного газотурбиностроения.

Практика показала, что ремонт лопаток из высокожаропрочных сплавов с объемным содержанием  $\gamma'$ -фазы  $g = 50...65\%$  и более сваркой плавлением и наплавкой далеко не всегда приводит к положительным результатам. При использовании специальных приемов иногда

удается получить восстановленный участок, удовлетворяющий условиям эксплуатации лопатки [4–10].

Успешные исследования в конце прошлого столетия, проведенные в нашей стране и за рубежом, позволили разработать высокотемпературные припои на никелевой основе и процесс так называемой диффузионной пайки с общим нагревом в вакууме, позволяющие создавать паяные соединения (ПС), в ряде случаев удовлетворяющие требованиям эксплуатации деталей горячего тракта ГТ.

Столь высококачественные ПС можно получить только при капиллярных зазорах до 0,1 мм. По сравнению с основным металлом в ПС при увеличении зазора более 0,15...0,20 мм кратковременная и длительная прочность уменьшаются до 2–4 раз при высокой температуре что, безусловно, недопустимо для деталей ГТ [11–13].

Применение порошковых композиционных припоев (ПКП) — смеси порошков припоя и наполнителя из основного металла — позволило значительно повысить работоспособность ПС (их кратковременная и длительная прочность составляет 0,5...0,7 таковой для основного металла). Это и послужило основанием использования ПКП для ремонта различных поверхностных дефектов лопаток методом высокотемпературной пайки в вакууме [14].

В настоящее время все ведущие зарубежные и отечественные предприятия успешно применяют высокотемпературную пайку в вакууме для ремонта лопаток соплового агрегата, створок регулируемого сопла, сопловых уплотнений, отверстий под штифт в сопловых лопатках и других деталей горячего тракта ГТ [15–17].

Главная цель технологического процесса диффузионной пайки восстанавливаемого изделия — приблизить структуру металла паяного шва к структуре основного сплава за счет активированного диффузионного взаимодействия. В случае ремонтной пайки целесообразно использовать припой с максимально возможным соответствием его состава, в частности

наполнителя, содержанию компонентов в восстанавливаемом изделии [18].

К недостаткам высокотемпературной пайки с общим нагревом в вакууме относится его высокая энергоемкость: процесс длится 4...6 ч и более, что оправдано с точки зрения производительности лишь при загрузке партии лопаток более 60...80 шт. Кроме того, продолжительность нагрева деталей в вакууме приводит к изменению структуры их поверхностного слоя, отрицательно влияющей на их эксплуатационные характеристики. Также ограничена возможность дальнейшего повышения жаропрочности наплавляемого материала увеличением доли наполнителя в ПКП, так как это требует повышения температуры пайки до 1210...1260 °С, при которой могут возникнуть необратимые структурные изменения.

Таким образом, из-за трудностей получения требуемых эксплуатационных характеристик ПС, низкой энергетической эффективности пайки с общим нагревом малоразмерных соединений в локальном участке деталей ГТ этот процесс с позиции ресурсо- и энергосбережения далеко не всегда удовлетворяет производство.

Цель работы — повышение механических свойств ПС при ремонте поверхностных дефектов деталей из литейных высокожаропрочных никелевых сплавов с использованием дугового нагрева в вакууме.

Повысить работоспособность неразъемных соединений (особенно малоразмерных) можно высокотемпературной пайкой при минимально возможном термическом воздействии на основной металл путем локального нагрева в вакууме, в частности дугового разряда с полым катодом (ДРПК) [19]. Разработанный процесс дуговой пайки в вакууме с подачей ПКП в наибольшей степени сочетает в себе достоинства способов наплавки и высокотемпературной пайки с общим нагревом [20].

**Методика проведения экспериментов.** Пайку проводили с использованием локального источника энергии ДРПК на вакуумной установке СДВ-11. Давление в камере при пайке поддерживали в пределах 0,07...0,10 Па при подаче аргона через полость катода 1,0...2,0 мг/с. Параметры режима при дуговой пайке изменяли в следующих диапазонах: ток — 15...50 А; напряжение — 32...34 В; длину дугового промежутка — 20...40 мм.

Полые катоды изготавливали из танталовой фольги с полостью диаметром 2,8...3,0 мм. Питатель вибрационного типа обеспечивал подачу ПКП грануляцией от 100 до 200 мкм. Присадочным материалом являлся ПКП (механическая смесь припоя и наполнителя), наполнителями — порошки ЖС6К, ЖС6У и ЭП741. По рекомендациям ФГУП «ВИАМ» в качестве припоя за базовый взяли ВПр27. Присадочный материал при напайке подавали сбоку, используя различные приемы.

Качество ПС оценивали визуально (участки не должны иметь трещин, раковин, пор, подрезов, прожогов) и люминесцентным методом контроля.

Металлографические исследования проводили на микроскопе «Неофот-30». Микротвердость (по Виккерсу) измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н.

Анализ микрошлифов ПС, полученных дуговой пайкой в вакууме с различным массовым отношением припоя к наполнителю, позволил установить, что беспористые паяные швы можно получить при содержании в порошковой смеси не менее 50...60 % припоя.

### **Результаты экспериментов и их обсуждение.**

Суть процесса исправления поверхностных дефектов дуговой напайкой в вакууме заключается в следующем. Проводят выборку дефекта с образованием разделки и подготовку ее и прилегающего к ней основного материала под пайку. В вакуумной камере нагревают ДРПК поверхность разделки и прилегающую к ней поверхность лопатки до температуры смачивания припоем, после чего в разделку подают порошковую смесь до ее полного заполнения и смачивания припоем прилегающего к разделке материала лопатки.

Нагрев необходимо вести так, чтобы по возможности быстро создавать в области нагреваемой разделки близкое к стационарному температурное поле и поддерживать его до окончания процесса в сравнительно узком интервале температур 1170...1240 °С, где нижняя граница обусловлена температурой пайки, а верхняя — температурой опасных структурных превращений материала лопатки.

Такая схема нагрева позволяет точно дозировать и широко регулировать как интенсивность, так и локальность ввода тепловой энергии в зону исправления дефекта. Это позволяет гибко управлять термическим циклом на ста-

дии нагрева и охлаждения, а также степенью неравномерности температурного поля в высокотемпературной области нагреваемого участка лопатки, т. е. кинетикой термомодеформационного воздействия.

Вместе с тем информации о влиянии температуры пайки, продолжительности локального нагрева и оптимального отношения припоя к наполнителю на работоспособность ПС явно недостаточно.

Главной особенностью высокотемпературной пайки локальным источником энергии является ее кратковременность по сравнению с пайкой общим нагревом, так как осуществляется нагрев только зоны ПС конкретного восстанавливаемого участка детали площадью 10...300 мм<sup>2</sup>. Как правило, продолжительность нагрева зоны ПС до температуры начала плавления припоя составляет 30...120 с в зависимости от толщины ремонтируемой детали.

В диапазоне 20...1100 °С скорость нагрева изменяется от 160 до 50 °С/с, в интервале 1100...1240 °С — от 15 до 2 °С/с по мере достижения стационарного теплового состояния. Заполнение разделки композиционным припоем порциями в зависимости от ее объема длится 20...120 с и более, после чего в течение 280...400 с проходит естественное охлаждение материала за счет излучения.

В интервале 1240...1100 °С скорость охлаждения изменяется от 2 до 10 °С/с, в диапазоне 1100...900 °С — от 10 до 20 °С/с, при температуре ниже 900 °С — от 10 до 3 °С/с.

Полный термический цикл получения ПС ремонтируемого конкретного участка детали может продолжаться 2...10 мин. В результате ремонт 3–4 дефектов детали дуговой пайкой в вакууме составляет 6...30 мин, так как следующий дефект можно ремонтировать, не дожидаясь полного охлаждения предыдущего.

Расчетно-экспериментальные исследования показали, что применение неподвижного нормально-кругового источника теплоты с эффективной мощностью 200...1500 Вт при коэффициенте сосредоточенности 0,5...3,0 см<sup>-2</sup> обеспечивает требуемый прогрев практически всех типоразмеров поверхностных дефектов, например, на лопатках ГТ различного назначения.

Благодаря уникальным тепловым характеристикам ДРПК в вакууме удастся не только осуществлять сопутствующий подогрев (стабильно поддерживать в зоне пайки температуру в пределах 1170...1240 °С), но и управлять

температурой нагрева подаваемого ПКП, т. е. не перегревать его свыше температуры плавления порошкового наполнителя из сплава, близкого по составу к основному.

Исследования показали, что благодаря возможности относительно независимого управления нагревом ДРПК разделки дефекта и подачи ПКП в пульсирующем режиме порциями удавалось запаивать даже сквозные дефекты на пере неохлаждаемых лопаток толщиной до 5 мм при диаметре в корне разделки сквозного отверстия не более 3 мм. При этом напаянный материал, как правило, характеризовался отсутствием пор, трещин и несплавлений.

Напаянный материал состоял из расплавленного припоя и не полностью расплавленных частиц порошкового сплава ЖС6К, оплавление границ которых четко прослеживается на рис. 1. Вблизи зоны ПС материал детали не претерпевал заметных структурных изменений. Его структура была практически однородной:  $\gamma'$ -фаза имела вид скоагулированных частиц, равномерно распределенных по всему сечению, т. е. перегрев основного металла в переходной зоне не зафиксирован.

Анализ микротвердости показал, что ее значения в напаянном слое находятся в широком диапазоне (380...520 МПа) в зависимости от места измерения (припой ВПр27 или армирующая частица — сплав ЖС6К). Значения микротвердости в основном металле и диффузионной (переходной) зоне, протяженность которой

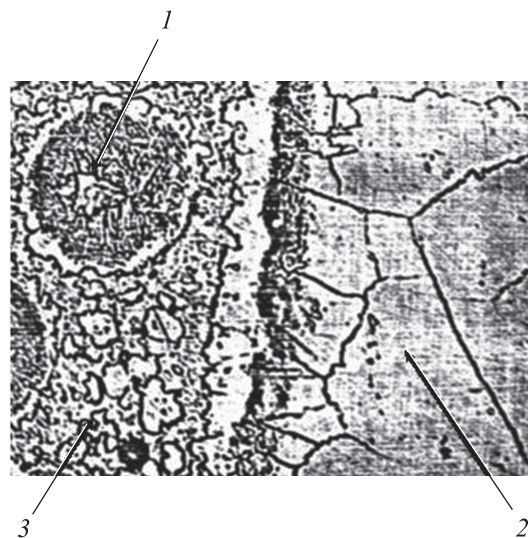


Рис. 1. Микроструктура ПС, полученного дуговой пайкой в вакууме с подачей ПКП (ВПр27 + ЖС6К), при увеличении  $\times 100$ :  
1 — наполнитель ЖС6К; 2 — ВПр27;  
3 — основной сплав ЖС6К

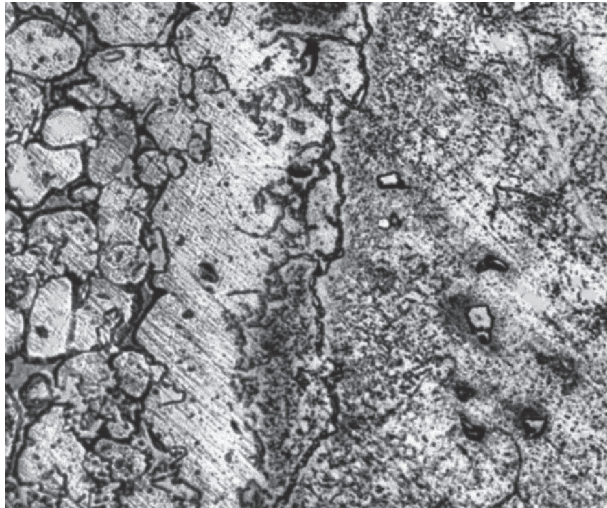


Рис. 2. Микроструктура переходной зоны между наплавляемым ПКП (слева) и основным металлом (справа) при увеличении  $\times 500$

составляет 0,2...0,3 мм, практически одинаковые (370...390 МПа), что обуславливает минимальные изменения исходной структуры (рис. 2).

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что дуговая напайка в вакууме с подачей ПКП дает возможность его нанесения с высокой прочностью сцепления с основным материалом, обусловленной диффузионным взаимодействием, практически сохраняя его исходную структуру.

Работоспособность ПС в деталях из высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов оценивали с помощью механических испытаний по стандартным методикам. Испытания на кратковременную, длительную прочность и многоцикловую усталость проводили совместно со специалистами Филиала АО «ОДК» «Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей» на цилиндрических образцах (ГОСТ 1497–73) диаметром 5 мм.

Для пайки образцов применяли ПКП, состоящий из 60 % припоя ВПр27 и 40 % наполните-

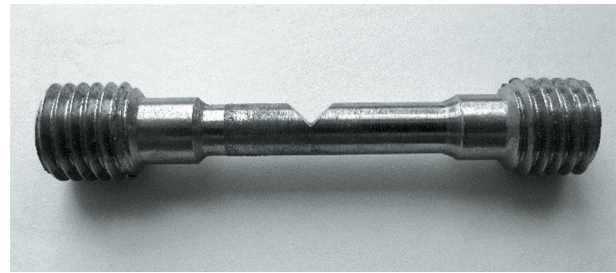


Рис. 3. Внешний вид образца с надрезом под пайку

ля ЖС6К или ЖС6У. Соотношение между припоем и наполнителем выбирали из условия, чтобы температура пайки соответствовала 1200...1210 °С.

Для оценки влияния ПС на работоспособность изделия сравнивали результаты испытаний, полученные на гладких образцах из сплава ЖС6К и на образцах с запаянным посередине надрезом глубиной 2 мм с углом раскрытия 90°, что приводило к уменьшению площади поперечного сечения образца на 40 % (рис. 3). После пайки образцы подвергали термической обработке в вакууме при температуре 1200 °С в течение 4 ч.

При температуре  $T = 20$  °С временное сопротивление образцов с запаянной разделкой ПКП составило 0,92...0,94 аналогичного показателя гладкого цилиндрического образца из ЖС6К, при повышенной температуре  $T = 975$  °С — 0,87...0,90.

Испытания паяных образцов на длительную прочность выполняли при температуре  $T = 975$  °С и нагрузке  $\sigma_{40} = 200$  МПа продолжительностью 40 ч. Результаты — значения времени до разрушения образцов при испытании на длительную прочность — приведены в табл. 1.

Время до разрушения образцов с запаянным надрезом при испытании на длительную прочность составило 0,67...0,75 аналогичного показателя для гладкого образца.

Испытания паяных образцов на усталость проводили на универсальной сервогидравли-

Таблица 1

Значения времени до разрушения образцов при испытании на длительную прочность

Образец	Время, ч		
	минимальное	максимальное	среднее
Гладкий	42	48	46
С запаянным надрезом, прошедший термообработку при температуре $T = 1200$ °С в течение 4 ч	28	36	32

Таблица 2

Значения предела усталости при знакопеременном симметричном цикле для испытываемых образцов

Образец	Предел усталости $\sigma_{-1}$ , МПа		
	минимальный	максимальный	средний
Гладкий	200,0	257,0	220,0
Гладкий, подвергшийся локальному (одностороннему) нагреву при температуре $T \approx 1200$ °С	180,0	220,0	200,0
С запаянным надрезом	80,0	91,0	85,0
С запаянным надрезом, прошедший термообработку при температуре $T = 1200$ °С в течение 4 ч	124,0	134,0	130,0

ческой испытательной машине «Шенк Гидропульс-160 кН» с частотой 50 Гц при ступенчато-возрастающей нагрузке до полного разрушения образца. Продолжительность ступени составляла 150 000 циклов. Результаты испытаний образцов на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов — значения предела усталости при знакопеременном симметричном цикле — приведены в табл. 2.

У цилиндрического образца с запаянным надрезом глубиной 2 мм предел усталости меньше почти в 1,7 раза, чем у гладкого, выполненный из сплава ЖС6К.

Для подтверждения эффективности применения дуговой порошковой пайки в вакууме при ремонте поверхностных дефектов дополнительно испытывали ПС на ударный изгиб (КCV) и усталость на специальных образцах из сплава ЖС6У (рис. 4). При испытаниях образ-

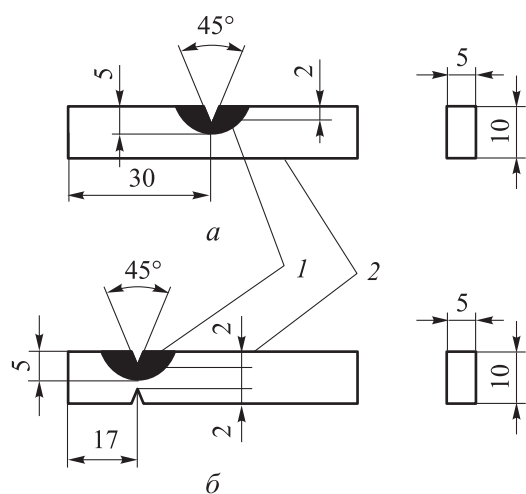


Рис. 4. Эскизы образцов с запаянной разделкой дуговой пайкой в вакууме для испытаний на ударную вязкость (а) и усталостную прочность (б):

1 — напаянный слой; 2 — основной материал

цов с напайкой определяли характеристики комплекса: напайка — прилегающие участки материала (рис. 5).

Установлено, что нагрев при дуговой пайке не ухудшает механические свойства основного материала в зоне термического влияния. Показатели ударной вязкости образцов с запаянным слоем из композиционного материала находятся на уровне аналогичных показателей образцов из основного материала, значения которых составляли 20...22 Дж/см<sup>2</sup>.

Многоцикловые испытания на усталость проводили при изгибе, подвергая поверхность образца воздействию растягивающих напряжений на вибраторе с электродинамическим возбуждением, где колебания передаются через заделку.

Характерной особенностью испытаний на усталость являлось то, что их прекращали при снижении частоты нагружения на 10 %. Образцы не доводили до разрушения. Усталостные трещины фиксировали люминесцентным методом. Значения предела выносливости образцов с запаянной разделкой дуговой пайкой в вакууме с подачей ПКП (ВПр-27 + ЖС6У) и образцов из сплава ЖС6У различались незначительно (рис. 6).

Как подтвердил промышленный опыт, дуговую пайку в вакууме с подачей ПКП в зону нагрева можно использовать для ремонта поверхностных дефектов на сопловых лопатках.

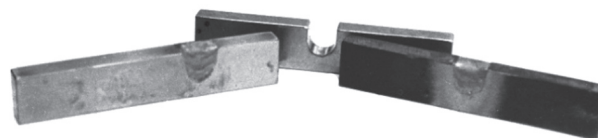


Рис. 5. Внешний вид образца с запаянной разделкой дуговой пайкой в вакууме с подачей ПКП

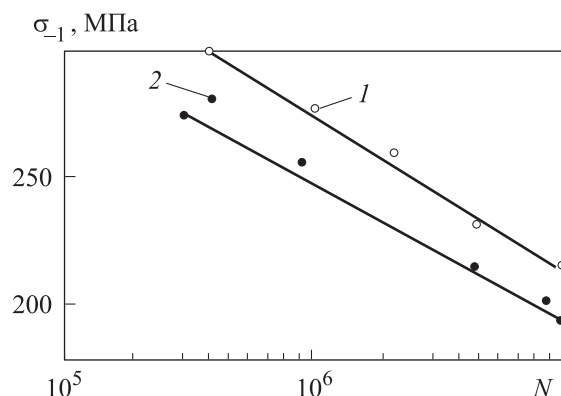


Рис. 6. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (линии) зависимости среднего значения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  от числа циклов  $N$ :  
1 — образцов из сплава ЖС6У; 2 — образцов с запаянной разделкой дуговой пайкой в вакууме с подачей ПКП (ВПр-27 + ЖС6У)

По механическим свойствам ПС и основной металл различаются незначительно, поэтому этот способ также можно рекомендовать для ремонта более нагруженных деталей ГТД, чем сопловые лопатки.

Анализ результатов механических испытаний и металлографических исследований неразъемных соединений, полученных дуговой пайкой в вакууме с подачей ПКП, показал, что их работоспособность, как правило, выше, чем

у соединений, созданных диффузионной пайкой с общим нагревом в вакууме.

Дополнительно это подтверждают и натурные испытания на стендовых ГТД и установках. Так, срок службы сопловых лопаток ГТ, восстановленных дуговой пайкой в вакууме, почти в 2 раза больше, чем у лопаток, восстановленных аргонодуговой наплавкой.

## Выводы

1. Способ дуговой пайки в вакууме с подачей ПКП в зону нагрева можно применять для ремонта поверхностных дефектов сопловых лопаток ГТ, выполненных из высокожаропрочных литейных сплавов на никелевой основе.

2. Результаты металлографических исследований и механических испытаний паяных соединений, полученных при ремонте поверхностных дефектов сопловых лопаток дуговой пайкой с подачей ПКП, показали, что их работоспособность выше, чем у соединений, выполненных высокотемпературной пайкой в вакууме с общим нагревом.

3. Так как по механическим свойствам ПС и основной металл различаются незначительно, предложенный способ можно рекомендовать для ремонта более нагруженных деталей ГТД, чем сопловые лопатки.

## Литература

- [1] Каблов Е.Н. *Литые лопатки газотурбинных двигателей*. Москва, Наука, 2006. 632 с.
- [2] Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегические направления развития материалов и технологий, их переработки на период до 2030 года. *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 1. URL: [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015\\_1\\_1\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015_1_1_1.pdf)
- [3] Ксенофонтов Д.С., Козырева О.Е. Определение причины разрушения деталей из никелевого сплава в процессе изготовления. *Тр. конф. МИКМУС-2021*. Москва, ИМАШ РАН, 2021, с. 47–52.
- [4] Яровицын А.В., Хрущов Г.Д., Червяков Н.О. Современное состояние ремонта лопаток из никелевых жаропрочных сплавов с применением сварки плавлением: обзор. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*, 2016, № 11, с. 61–67.
- [5] Сорокин Л.И. Аргонодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов. *Сварочное производство*, 2004, № 7, с. 36–39.
- [6] Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Ч. 2. *Сварочное производство*, 2004, № 9, с. 3–7.
- [7] Лукин В.И., Семенов В.Н., Старова Л.Л. и др. Образование горячих трещин при сварке жаропрочных сплавов. *Металловедение и термическая обработка материалов*, 2001, № 12, с. 7–14.
- [8] Жеманюк П.Д., Петрик И.А., Чигилейчик С.Л. Опыт внедрения технологии восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин

- высокого давления в условиях серийного производства. *Автоматическая сварка*, 2015, № 8, с. 43–46.
- [9] Голубовский Е.Н., Жаткин С.С., Паркин А.А. Исследование и отработка технологии восстановления лопаток ГТД после эксплуатации лазерной наплавкой. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2021, т. 23, № 3, с. 29–33, doi: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-29-34.
- [10] Климов В.Г., Никитин В.И., Жаткин С.С. и др. Особенности формирования структуры и свойств жаропрочного припоя ВПр11-40Н при лазерной наплавке на перо лопатки ГТД. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2018, т. 20, № 4–2, с. 159–164.
- [11] Корниенко А.Н., Жадкевич А.М. Состояние и проблемы внедрения пайки для ремонта лопаток газотурбинных двигателей. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2005, № 10, с. 9–12.
- [12] Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С. и др. 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.
- [13] Pouranvari M., Ekrami A., Kokabi A.H. Diffusion brazing of cast Inconel 718 superalloy utilising standard heat treatment cycle. *Mater. Sci. Technol.*, 2014, vol. 30, no. 1, pp. 109–115, doi: <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000320>
- [14] Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Припои на никелевой основе для пайки жаропрочных сталей и сплавов. *Сварочное производство*, 2014, № 7, с. 36–42.
- [15] Кривоносова Е.А., Воробьев А.Н., Кривоносова Е.К. Восстановление поверхностей деталей из никелевых сплавов методом печной пайки. *Тяжелое машиностроение*, 2017, № 6, с. 32–35.
- [16] Максимова С.В., Воронов В.В., Ковальчук И.В. Припой без бора и кремния для пайки жаропрочного никелевого сплава. *Автоматическая сварка*, 2017, № 8, с. 15–21, doi: <https://doi.org/10.15407/as2017.08.02>
- [17] Оспенникова О.Г., Лукин В.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н. и др. Перспективные разработки в области высокотемпературной пайки жаропрочных сплавов. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 8. URL: [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2017/2017\\_S\\_10\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2017/2017_S_10_1.pdf)
- [18] Хорунов В.Ф., Максимова С.В., Зволинский И.В. Применение композиционных припоев на базе системы Ni-Cr-Zr для пайки жаропрочных никелевых сплавов. *Сб. тр. Межд. науч.-тех. конф. Пайка-2005*. Тольяти, ТГУ, 2005, с. 175–179.
- [19] Неровный В.М., Ямпольский В.М. *Сварочные дуговые процессы в вакууме*. Москва, Машиностроение, 2002. 263 с.
- [20] Неровный В.М. Ремонт деталей газовых турбин дуговой пайкой и наплавкой в вакууме. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2006, № 8, с. 10–14.

## References

- [1] Kablov E.N. Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigateley [Cast blades of gas-turbine engines]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 632 p. (In Russ.).
- [2] Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviatsionnye materialy i tekhnologi* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1. URL: [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015\\_1\\_1\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015_1_1_1.pdf) (in Russ.).
- [3] Ksenofontov D.S., Kozyreva O.E. [Determination of destruction cause of nickel alloy parts in the manufacturing process]. *Tr. konf. MIKMUS-2021* [Proc. MIKMUS-2021]. Moscow, IMASH RAN Publ., 2021, pp. 47–52. (In Russ.).
- [4] Yarovitsyn A.V., Khrushchov G.D., Chervyakov N.O. The current state of repair of blades from nickel superalloy using welding point: overview. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences], 2016, no. 11, pp. 61–67. (In Russ.).



- [5] Sorokin L.I. Argon-arc surfacing of blade flanges of high-temperature nickel alloys. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 7, pp. 36–39. (In Russ.).
- [6] Sorokin L.I. Weldability of heat-resistant nickel alloys (review). P. 2. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 9, pp. 3–7. (In Russ.).
- [7] Lukin V.I., Semenov V.N., Starova L.L. et al. Formation of hot cracks in welding of refractory alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka materialov*, 2001, no. 12, pp. 7–14. (In Russ.). (Eng. version: *Met. Sci. Heat Treat.*, 2001, vol. 43, no. 11–12, pp. 476–480, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1014896821621>)
- [8] Zhemanyuk P.D., Petrik I.A., Chigileychik S.L. Experience of introduction of the technology of reconstructive microplasma powder surfacing in repair of high pressure turbine blades in batch production. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic Welding], 2015, no. 8, pp. 43–46. (In Russ.).
- [9] Golubovskiy E.N., Zhatkin S.S., Parkin A.A. Research and development of the technology for restoring the blades of the gas turbine engine after operation by laser surfacing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [SamSC RAS], 2021, vol. 23, no. 3, pp. 29–33, doi: [10.37313/1990-5378-2021-23-3-29-34](https://doi.org/10.37313/1990-5378-2021-23-3-29-34). (In Russ.).
- [10] Klimov V.G., Nikitin V.I., Zhatkin S.S. et al. Features of formation of structure and properties of heat resisting VPR11-40H solder at laser cladding on the shovel feather GTE. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [SamSC RAS], 2018, vol. 20, no. 4–2, pp. 159–164. (In Russ.).
- [11] Kornienko A.N., Zhadkevich A.M. State and problems of introducing brazing for repair of gas turbine engine blades. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*, 2005, no. 10, pp. 9–12. (In Russ.).
- [12] Kablov E.N., Evgenov A.G., Rylnikov V.S. et al. Study of finely dispersed powders of solders for diffusion vacuum brazing obtained by melt atomization. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, spec. iss. Prospective construction materials and technologies, pp. 79–87. (In Russ.).
- [13] Pouranvari M., Ekrami A., Kokabi A.H. Diffusion brazing of cast Inconel 718 superalloy utilising standard heat treatment cycle. *Mater. Sci. Technol.*, 2014, vol. 30, no. 1, pp. 109–115, doi: <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000320>
- [14] Lukin V.I., Rylnikov V.S., Afanasyev-Khodykin A.N. Nickel-based brazing alloy to braze heat-resistant alloys and steels. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2014, no. 7, pp. 36–42. (In Russ.).
- [15] Krivonosova E.A., Vorobyev A.N., Krivonosova E.K. Refacing of workpiece from nickel alloys by furnace brazing. *Tyazheloe mashinostroenie* [Russian Journal of Heavy Machinery], 2017, no. 6, pp. 32–35. (In Russ.).
- [16] Maksimova S.V., Voronov V.V., Kovalchuk I.V. Brazing filler metal without boron and silicon for brazing of heat-resistant nickel alloy. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic Welding], 2017, no. 8, pp. 15–21, doi: <https://doi.org/10.15407/as2017.08.02> (in Russ.).
- [17] Ospennikova O.G., Lukin V.I., Afanasyev-Khodykin A.N. et al. Advanced developments in the field of the high-temperature soldering of heat resisting alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. S. URL: [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2017/2017\\_S\\_10\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2017/2017_S_10_1.pdf) (In Russ.).
- [18] Khorunov V.F., Maksimova S.V., Zvolinskiy I.V. Application of composite solders based on the Ni-Cr-Zr system for brazing heat-resistant nickel alloys. *Sb. tr. Mezhd. nauch.-tekh. konf. Payka-2005* [Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. Brazing-2005]. Tolyati, TGU Publ., 2005, pp. 175–179. (In Russ.).
- [19] Nerovnyy V.M., Yampolskiy V.M. *Svarochnye dugovye protsessy v vakuume* [Welding arc processes in vacuum]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 263 p. (In Russ.).
- [20] Nerovnyy V.M. Repair of details of gas turbines by the arc soldering and welding deposition in vacuum. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2006, no. 8, pp. 10–14. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 19.10.2022

## Информация об авторах

**НЕРОВНЫЙ Вячеслав Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vmn@bmstu.ru).

**КОНОВАЛОВ Алексей Викторович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

## Information about the authors

**NEROVNIY Vyacheslav Michailovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vmn@bmstu.ru).

**KONVALOV Aleksey Viktorovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Неровный В.М., Коновалов А.В. Структура и свойства паяных соединений высоколегированных никелевых сплавов, полученных с помощью дугового нагрева в вакууме. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 2, с. 30–39, doi: 10.18698/0536-1044-2023-2-30-39

### Please cite this article in English as:

Nerovniy V.M., Konovalov A.V. Structure and Properties of Soldered Joints of the High-Alloyed Nickel Alloys Obtained by Arc Heating in the Vacuum. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 2, pp. 30–39, doi: 10.18698/0536-1044-2023-2-30-39



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям монографию «Виртуальные частицы и взаимодействия»

Авторы: А.И. Круглов, В.С. Окунев

На основе расширения понятия физического вакуума анализируются свойства частиц обменных фундаментальных взаимодействий и свободных виртуальных частиц. Туннелирование рассматривается как переход реальных частиц в виртуальные состояния. Делается попытка объяснить некоторые несоответствия экспериментальных фактов современной физики. Исследуются фотон-фотонные взаимодействия, расширяется механизм образования массы во Вселенной. Обсуждается возможность спонтанной мультифрагментации космологической сингулярности (фундаментальной частицы — максимона).

Для специалистов, занимающихся фундаментальными и прикладными задачами специальной и общей теории относительности, для студентов вузов, изучающих курсы общей физики.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>