



Белявин А. Ф.

Федотов Д. А.

Куренкова В. В.

ИЦ «Патон Турбайн
Текнолоджиз»

Belyavin A. F.

Fedotov D. A.

Kurenkova V. V.

JRC "Paton Turbine
Technologies"

УДК 621.791.92:526.001.4

КОМПЛЕКСНЫЙ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ КАК СПОСОБ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ДВИГАТЕЛЯ Д-30КП-2

Разработана технология комплексного ремонта сопловых лопаток с коррозионно-эрозионными повреждениями и термоусталостными трещинами. Процесс ремонта включает восстановление поврежденного материала методом TIG-наплавки и пайки композиционными припоями с полным циклом термомеханических обработок.

Ключевые слова: сопловые лопатки, коррозионно-эрозионные повреждения, термоусталостные трещины, TIG – наплавка, пайка, композиционные припои.

Условия эксплуатации компонентов турбины газотурбинных двигателей (высокая температура, градиент температур, вибрация, наличие продуктов окисления) приводят к постепенному разрушению деталей горячего тракта вследствие коррозионно-эрозионных повреждений, возникновения трещин термической усталости и протекания структурных изменений в базовом материале.

Ремонту подвергались сопловые лопатки после эксплуатации со значительными коррозионно-эрозионными повреждениями входных кромок, газоабразивным износом бандажных полок с многочисленными трещинами термической усталости и растрескиванием выходных кромок (рис. 1, а, б). Ремонт изделий состоял в удалении деградированного материала, очистке, разделке дефектных мест, восстановлении материала методом TIG-наплавки, высокотемпературной вакуумной пайки с последующей термообработкой (рис. 1, в).

Высокая жаропрочность сплава ЖС6У, из которого выполнены лопатки, подвергающиеся ремонту, определяется большой объемной долей упрочняющей γ' -фазы (56 ÷ 57,5) об.% и высокой дисперсностью вторичных выделений γ' -фазы Ni_3Al , образующихся при старении пересыщенного твердого раствора на основе

никеля и имеющих кубическую форму при несоответствии параметров γ'/γ решеток 0,3 – 0,5%. Высокое содержание в сплаве ЖС6У алюминия и титана – до 7,1 – 8,9 мас.% обеспечивает выделение упрочняющей γ' – Ni_3Al – фазы и, следовательно, определяет значительную восприимчивость сплава к возникновению трещин дисперсионного твердения при процессах наплавки/ сварки.

Выбор присадочного материала в виде сплава IN-625, относящегося к сплавам твердорастворного упрочнения, с малым содержанием Al и Ti (до 0,8%) снижает склонность к выделению в закристаллизовавшемся металле шва упрочняющей γ' – Ni_3Al – фазы и, соответственно, возникновению трещин дисперсионного твердения. Наплавленный материал IN-625 обеспечивает ремонтной зоне необходимую стойкость против окисления и коррозии, а также – сопротивление ползучести при рабочей температуре. Рис. 1, в и 2 иллюстрируют внешний вид и структуру входной кромки после восстановления ее наплавкой с применением сплава IN-625. Наблюдается достаточно плотная структура закристаллизовавшегося металла сформированного шва без каких-либо пор, непроваров или кристаллизационных трещин.



а



б



в

Рис. 1. Общий вид сопловой лопатки с коррозионно- эрозийными повреждениями после эксплуатации с (а,б) и комплексного ремонта (в)

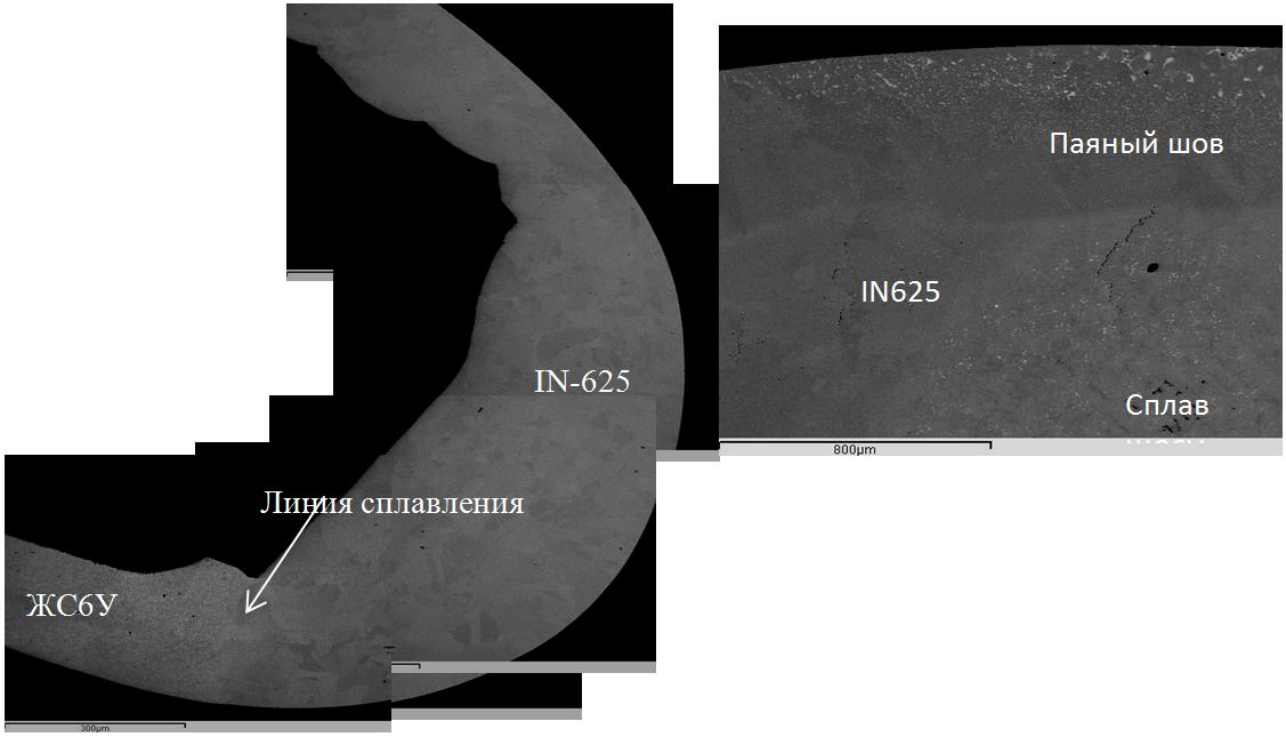
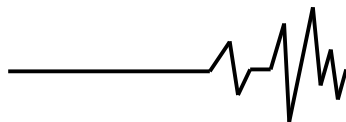


Рис. 2. Общий вид входной кромки, восстановленной наплавкой с применением присадочного материала – сплава IN625 (а) и микроструктура паяного шва, сформированного высокотемпературной пайкой на сплаве IN-625 с использованием композиционного припоя



Однако, в ходе практического использования данного вида присадочной проволоки при TIG-наплавке полностью гарантировать получение качественных бездефектных швов не представлялось возможным ввиду высокой термической нестабильности основы (при более высоком содержании углерода и вольфрама). Проблема устранения трещин дисперсионного твердения при охлаждении, как в зоне термического влияния, так и в сварном шве может быть решена путем применения высокотемпературной пайки композиционными припоями. Так при обнаружении на поверхности наплавки трещин осуществляли механическую разделку и «залечивание» их высокотемпературной пайкой с применением композиционных припоев. Расплав используемого припоя хорошо смачивал сплав IN-625, и в процессе пайки происходило формирование паяного шва удовлетворительного качества. Как видно из рис. 2, б, трещина, возникшая в основе – сплаве ЖС6У, в результате пайки

залечивалась и не распространялась далее в наплавленный шов.

Ранее были проведены детальные исследования [2] физико-механических свойств паяных соединений сплава ЖС6У, полученных с использованием комплексных бор- и кремнийсодержащих припоев, в которых основой служил легкоплавкий припой системы NiCoCrAl+2,5%B (#1). В качестве наполнителя вводили 60мас.% порошка суперсплава (в настоящем – компонента #2). Изучалась взаимосвязь микроструктуры металла паяного шва с прочностными и пластическими характеристиками паяных соединений при 20°C.

Было установлено, что применение бор-, кремнийсодержащего припоя обеспечивает паяным соединениям запас пластичности при деформационном упрочнении металла паяных швов (рис. 3). Наблюдается прямо пропорциональная зависимость относительного удлинения от разности предела прочности (σ_B) и текучести ($\sigma_{0,2}$) паяных соединений.

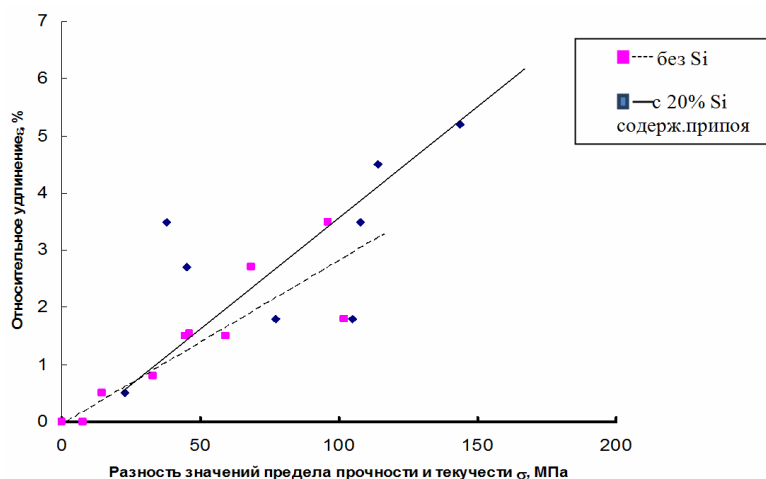


Рис. 3. Взаимосвязь между относительным удлинением и уровнем деформационного упрочнения паяных соединений сплава ЖС6У, полученных с использованием комплексных припоев типа #1+60%#2 без и с добавкой кремнийсодержащего припоя

Кратковременная прочность паяных соединений при комнатной температуре согласуется с данными, полученными для основного сплава ЖС6У, термообработанного по режиму полного цикла пайки, а именно, – 790-950МПа. При испытаниях образцов паяных соединений относительное удлинение достигало 1,8 – 5,2%, что находилось на уровне паспортных данных для литого сплава ЖС6У.

Острый пик на статистической кривой предела прочности, рис.4, подтверждает добротность и стабильность технологического процесса пайки. Более 87% образцов ПС

достигали предел прочности 800-975 МПа. Практически все образцы способны пластически деформироваться до окончательного разрушения при 20°C. Диаграмма фиксирует способность ПС выдерживать определенную пластическую деформацию при растяжении: на представленных кривых наблюдается существенное различие (до 100МПа) между значениями σ_B и $\sigma_{0,2}$ испытанных соединений. Размытый максимум кривой предела текучести $\sigma_{0,2}$ указывает на наличие технологических отклонений в процессе пайки образцов.

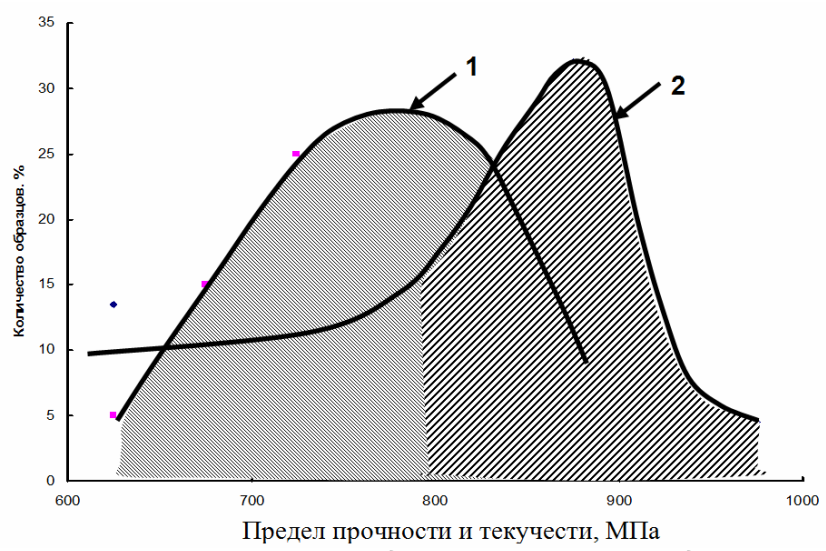


Рис. 4. Статистические кривые распределения значений пределов текучести (1) и прочности (2) паяных соединений, полученных изотермической пайкой при 1220-1225°C (20-15мин) сплава ЖС6У после термообработки, испытанных при 20°C

Хорошие механические характеристики паяных соединений сплава ЖС6У определяются оптимальной структурой паяных швов, сформированных с применением двух и трехкомпозиционных систем припоев, применяемых на этапе высокотемпературной пайки при ремонте сопловых лопаток первой ступени двигателя Д-30КП-2.

Для паяных швов, полученных с применением композиционного борсодержащего припоя #1+60%#2 присуще выделение в высоколегированном матричном растворе большого количества вторичных карбоборидных образований, которые существенным образом влияют на механические свойства соединений, а именно недостаточную прочность при минимальной пластичности. Вторичные фазы представляют собой прежде всего квазибинарные эвтектики типа $\gamma + \text{Me}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$, формирующиеся на основе боридов CrB. Данные эвтектические выделения достаточно стабильны и при большой ширине зазора и, соответственно большом количестве расплава, данные фазы сохраняются и после термообработки. Кроме эвтектик $\gamma(\text{Ni}) + \text{CrB}$ в металле шва имеют место междендритные выделения сложнелегированных эвтектик на базе $\gamma(\text{Ni}) + \text{Ni}_3\text{B}$ (рис. 5 а, в, д). Объемное содержание вторичных фаз в шве сплава ЖС6У при применении борсодержащего припоя #1+60%#2 после пайки достигает 40 мас.%, а после полного цикла термообработки составляет 9 – 21% в зависимости от ширины зазора.

Для трехкомпонентного припоя 20% #1+20%Si-содерж.припой+60%#2 характерна

(присущая кремнийсодержащим припоям) меньшая реакционность по отношению к основному металлу (слабая химическая эрозия основы), удовлетворительное заполнение зазоров и протекание расплава на всю глубину капилляра, ограниченная пористость, отсутствие усадочных дефектов в шве (рис. 5 б, г, е) и т.д.

Шов, сформированный с применением припоя #1+Si-содерж.припой+60%#2, имеет дендритную структуру с размером ячейки – 30-70 мкм и представляет собой высоколегированный матричный раствор с выделениями карбидных фаз. Кремний растворялся в матрице до 1,5 мас.% по оси дендрита и до 2,5 мас.% в междендритных областях. Выявленные в металле шва карбидные фазы – двух типов: дисперсные пограничные типа Me_{23}C_6 (на основе Cr, W, Mo, Re) и более крупные глобулярные типа MeC на Ta, Hf, Ti. Карбидные фазы в металле шва глобулярной конфигурации не оказывают отрицательного влияния на прочностные характеристики соединений. Введение эвтектической композиции с кремнием в припой позволяет снизить объемное содержание хрупких вторичных фаз до 4,6–5,1 об.%. Наряду с кремнием в металл шва из Si-содерж. припоя дополнительно поступает до ~17 мас.% Ni. Соответственно, уменьшается степень легирования шва, и равновесие в затвердевавшем припое сдвигается в сторону образования γ -раствора и фаз цементитного типа, что приводит к увеличению пластичности металла шва.

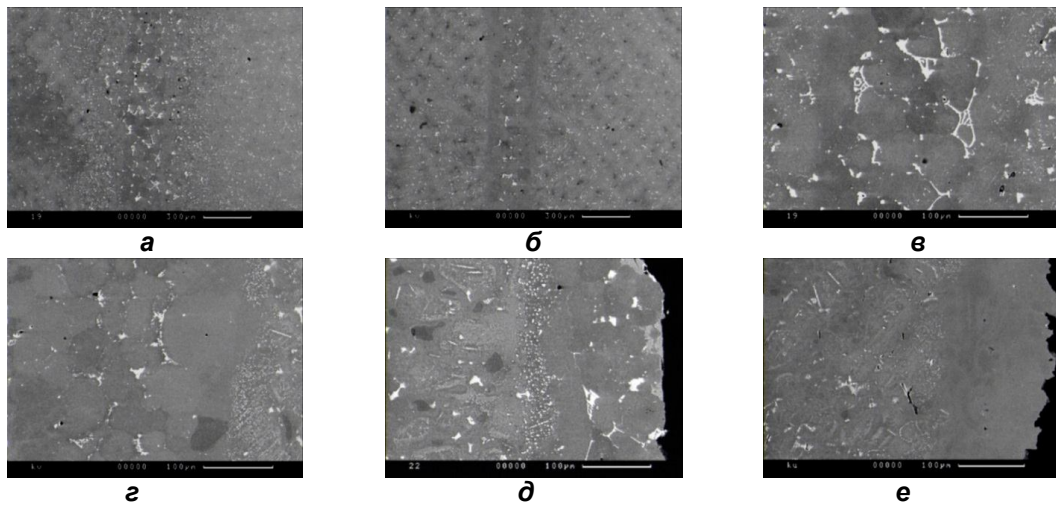


Рис. 5. Микроструктура образцов паяных соединений сплава ЖС6У, сформированных при 1220°C (20мин) борсодержащим припоем #1+60%#2 (а, в, д) и бор-, кремнийсодержащим припоем #1+20%Si-содерж. припой +60%#2 (б, г, е). а, б, в, г - $\times 50$; $\times 200$; д, е – разрушение ПС при одноосном растяжении $\times 200$

Для швов, сформированных композиционным припоем 20%#1+ 20% Si-содерж. припой +60%#2 как на металле базового сплава так и наплавленного TIG-наплавкой, характерна высокая плотность, полное отсутствие усадки при кристаллизации в зазоре, минимальное количество непропаев и пор по сравнению с другими рассматриваемыми типами припоев. Для данного припоя с кремнием характерна минимальная реакционная способность по отношению к паяемой основе: диффузионная зона составляет 50-70мкм.

Исходя из исследований, проведенных при ремонте рабочих лопаток ТВД 1ст. Д-30КП (Сплав ЖС6У) методом вакуумной пайки было определено, что качество паяных зон является важным фактором при последующем

формировании на них целостного алитированного покрытия. Адгезия покрытия и ремонтной зоны хорошая, межфазная граница – чистая, равномерная, рис.6. Именно минимальное количество вторичных грубых фаз и карбоборидных эвтектик при применении трехкомпозиционного припоя дает возможность формировать плотный защитный слой на участках, подвергшихся ремонту пайкой. При формировании алитированного покрытия на шве, полученном с применением пачечной смеси 20%#1+Si-содерж.припой+60%#2, не наблюдается шероховатость поверхности, вызванная оплавлением боридных эвтектик (как в варианте борсодержащего припоя), ввиду их отсутствия в закристаллизовавшемся металле шва (рис. 6).

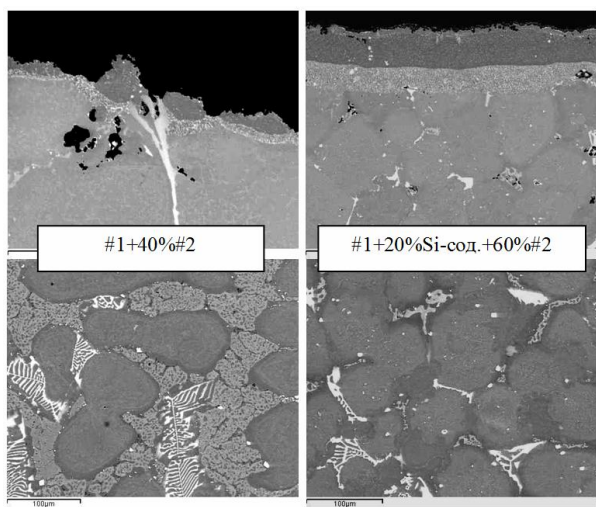
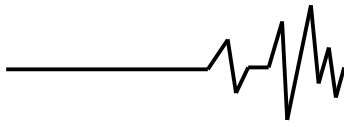


Рис. 6. Общий вид паяных швов на выходной кромке модельной лопатки, сформированных при 1215°C (20 мин) и двухступенчатой термообработке с применением различных типов припоев (а-г) и алитированным покрытием (д,е)



Таким образом, был проведен ремонт входной и выходной кромок, бандажных полок сопловых лопаток, заключающийся в наплавке, пайке, механической и термической обработке изделий. Установлено, что при восстановлении входных кромок с глубокими повреждениями целесообразно использовать систему #1+60%#2 для обеспечения вязкости расплава и восстановления профиля лопатки. В случае «залечивания» тонких зазоров, капиллярных трещин (например, на бандажных полках, в карманах и т.д.) необходимо использовать припой #1+20%Si-содерж.припой+60%#2, обладающий хорошей технологичностью и меньшим интервалом кристаллизации. Длительная прочность паяных соединений является важной служебной характеристикой. В результате испытаний на длительную прочность при напряжении 196МПа и температуре 900°С паяные соединения разрушались в основном по металлу шва и удлинение ε составляло (1-5)%. В результате высокотемпературного воздействия структура металла шва и диффузионной зоны при использовании припоев с Si не претерпевала существенных изменений, размер шва не изменялся (эрозия исключалась).

Разработанная технология ремонта позволяет восстанавливать лопатки с прогаром входной кромки и трещинами, расположенными в зоне выходной кромки, а также позволяет восстанавливать геометрию бандажных полок, обеспечивая значительное снижение линейных и точечных дефектов в этих зонах. Так геометрия лопатки, которая имела газоабразивный (эрозионный) износ 25% площади бандажной полки с многочисленными сквозными трещинами термической усталости, была восстановлена с незначительным количеством линейных дефектов поверхности; на входной и выходной кромках лопаток, прошедших восстановительный ремонт, дефекты не обнаруживались. Лопатки переданы Заказчику и поставлены в состав турбины для дальнейшей эксплуатации. Таким образом, совместное использование наплавки и высокотемпературной пайки со всем комплексом термомеханических операций являлось правильным решением в технологическом процессе ремонта и восстановления изделий после эксплуатации.

Список использованных источников

1. Полянский В.М. Структура, свойства и механизм разрушения никелевого литейного жаропрочного сплава / В.М. Полянский, В.В. Гаврилюк, В.З. Загорский, А.В. Логунов, А.М.

Полянский, М.И. Силис. – Материаловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – №9. – С. 32–34.

2. Белявин А.Ф. Прочность и микроструктура паяных соединений сплава ЖС6У, полученных с использованием комплексных бор- и кремнийсодержащих припоев / А.Ф.Белявин, В.В.Куренкова, И.С.Малашенко и др. // Современная электрометаллургия. – 2010. – N 2. – С. 40–51.

Список источников в транслитерации

1. Polyanskiy V.M. Struktura, svoystva i mehanizm razrusheniya nikelovogo liteynogo zharoprochnogo splava / V.M. Polyanskiy, V.V. Gavriilyuk, V.Z. Zagorskiy, A.V. Logunov, A.M. Polyanskiy, M.I. Silis. – Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 2004. – №9. – С. 32–34.

2. Belyavin A.F. Prochnost i mikrostruktura payanykh soedineniy splava ZhS6U, poluchennykh s ispolzovaniem kompleksnykh bor- i kremniysoderzhaschih pripoev / A.F.Belyavin, V.V.Kurenkova, I.S.Malashenko i dr. // Sovremennaya elektrometallurgiya. – 2010. – N 2. – С. 40–51.

КОМПЛЕКСНИЙ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИЙ РЕМОНТ ЯК ЗАСІБ ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ СОПЛОВИХ ЛОПАТОК ПЕРШОЇ СТУПЕНІ ДВИГУНА Д–30КП–2

Анотація. Розроблена технологія комплексного відновлювального ремонту соплових лопаток з корозійно-ерозійними пошкодженнями та тріщинами термічної втоми. Метод ремонту включає відновлення пошкодженого матеріалу TIG – наплавленням та пайкою композиційними припоями з повним циклом термомеханічної обробки.

Ключові слова: соплові лопатки, корозійно-ерозійні пошкодження, тріщини термічної втоми, ремонт, TIG-наплавлення, пайка, композиційні припої.

COMPREHENSIVE RESTORING REPAIR AS A WAY OF 1-ST STAGE D30KP-2 VANE LIFE EXTENSION

Annotation. Technology of comprehensive repair of vane's corrosion-erosion damages and thermal fatigue cracks was developed. Repair method included damaged material restoration by TIG-welding and composite alloy brazing with complete cycle of thermomechanical treatments.

Key words: vanes, corrosion-erosion damages, thermal fatigue cracks, welding, brazing, composite alloy.