

РЕМОНТ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ*

И. Б. МАРКОВ, И. А. ПЕТРИК, А. Г. СЕЛИВЕРСТОВ, Ю. А. МАРЧЕНКО

АО «МОТОР СИЧ». 69068, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15. E-mail: motor@motorsich.com

Представлены результаты работ по восстановлению поврежденного участка лопасти вентилятора газотурбинного двигателя путем приварки фрагмента методом электронно-лучевой сварки. Определен предел выносливости σ_{-1} лопаток вентилятора для двигателя Д-36 с тягой $16 \dots 65 \cdot 10^3$ Н, отремонтированных по данной технологии. Проведено металлографическое исследование лопаток с приваркой фрагмента после усталостных испытаний. Предложены перспективные направления по повышению предела выносливости ремонтных лопаток вентилятора. Библиогр. 8, табл. 2, рис. 9.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, титановый сплав, лопасти вентилятора, приварка фрагмента, термообработка, структура, предел выносливости

Лопатки вентилятора являются одними из наиболее ответственных и нагруженных деталей авиационного двигателя. Лопатки вентилятора имеют высокую стоимость вследствие применения индивидуальных заготовок и длительного цикла механической и термической обработки, полировки и доводки. Поэтому расширение видов ремонта лопаток актуально и экономически целесообразно. Наибольшее число эксплуатационных повреждений лопаток связано именно с попаданием в двигатель посторонних предметов. Следует отметить, что большинство всех повреждений лопаток расположены в надполочной части, по входной кромке. Повреждения рабочих лопаток вентилятора снижают характеристики двигателя, а значительные повреждения вследствие попадания (например, птиц) — влияют на безопасность полетов.

Действующая на предприятии АО «Мотор Сич» ремонтная документация предусматривает определенные нормы величин повреждений, допускаемых без исправления, а также ремонт повреждений такими методами как рихтовка входной кромки, зачистка и заполировка забоин, отрезка поврежденных участков входной кромки суммарной площадью не более 700 мм^2 . Следует учитывать, что при отрезке кромок снижается тяга двигателя. В случаях, когда повреждения превышают допустимые по ремонтной документации, детали бракуются.

На АО «Мотор Сич» опробована технология ремонта лопаток вентилятора двигателя Д-36 из двухфазного титанового сплава ВТЗ-1 путем приварки фрагмента методом электронно-лучевой

сварки (ЭЛС) вместо поврежденного участка с последующим определением предел выносливости σ_{-1} . Технология построена на базе опыта полученного на нашем предприятии [1], а также с учетом опыта других предприятий по восстановительному ремонту элементов и узлов газотурбинных двигателей [2].

Технологию сварки предварительно отрабатывали на плоских образцах. Сварку образцов выполняли с двух сторон на электронно-лучевой установке ЭЛУ-20, которая оборудована программным управлением параметрами режимов сварки, программным перемещением электронно-лучевой пушки и детали по заданным координатам. После сварки выполнена двухступенчатая термообработка (ТО) образцов, первая ступень отжига электронным лучом (ЭЛО), вторая ступень в печи. Определены механические свойства на сварных и цельных образцах, тип XIII, по ГОСТ 6996-66. На ГП «Ивченко-Прогресс» проведены прочностные расчеты и определены наибольшие действующие напряжения в местах предполагаемого расположения сварных швов. К областям с максимальными напряжениями относятся переход перо – антивибрационная полка и область сочленения пера с основанием замка лопатки. По результатам расчетов определены зона ремонта, расположение сварного шва (рис. 1) и параметры для дальнейшего проведения усталостных испытаний рабочих лопаток вентилятора Д-36 [3]. Для определения σ_{-1} в зоне ремонта для усталостных испытаний были назначены изгибные колебания по четвертой форме.

Разработана оптимальная конфигурация фрагмента (рис. 2) и определены размеры выводных планок (рис. 1, б) с учетом, что при ЭЛС возможно образование подрезов на кромках лопатки, ко-

*По материалам доклада, представленного на международной конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

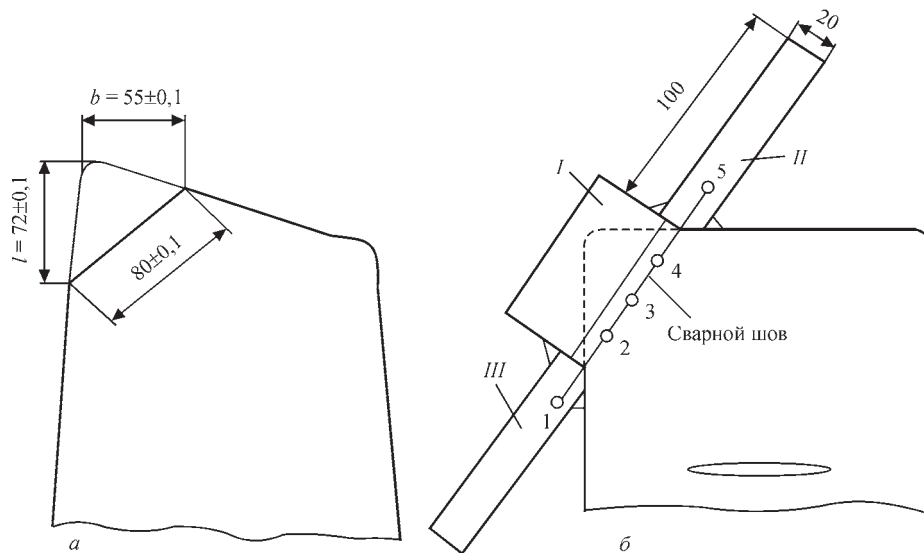


Рис. 1. Схемы расчетных зон ремонта (а) и расположения сварного шва (б): I — фрагмент приварки, II, III — выводные планки; 1–5 — базовые точки разделения шва на отрезки

торая имеет окончательные размеры. Материал фрагмента соответствует основному материалу детали.

Дальнейшая работа проводилась на натурных образцах лопаток. Поврежденные участки лопаток были обрезаны согласно ранее определенных расчетных зон ремонта (рис. 1, а; рис. 3, а).

В зоне приварки фрагмент обработан механическим способом под профиль пера лопатки и подогнан, обеспечивая повторение конфигурации профиля, выдерживая плавность перехода и припуск 0,3 мм по контуру с обеих сторон.

Сварка лопатки с прихваченным фрагментом (рис. 3, б) производилась методом ЭЛС с двух сторон. Сварной шов был разделен на отрезки пятью базовыми точками (рис. 1, б), с корректировкой режимов сварки в зависимости от изменения толщины сечения профиля пера лопатки, от 1,2 до 2,4 мм. Программирование параметров режимов сварки позволило обеспечить качественное формирование сварного шва и избежать образования дефектов в виде прожогов (табл. 1).

После сварки лопаток проведена двухступенчатая ТО (рис. 3, в) по следующему режиму: первая ступень ТО была выполнена ЭЛО на специализированной установке Лага-52 при $T = 910\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 10 мин. Режимы ЭЛО были подобраны по

аналогии с другими деталями ГТД из двухфазных титановых сплавов и в значительной мере уменьшили коробления [4]. Вторая ступень — печной отжиг — выполнен в защитной атмосфере при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3,0...3,5 ч.

В дальнейшем была выполнена механическая обработка приваренного фрагмента до получения требуемой конфигурации профиля с сохранением исходных размеров (рис. 3, з). Окончательно обработанные лопатки подвержены контролю мест ремонта методом ЛЮМ1-ОВ и рентген-

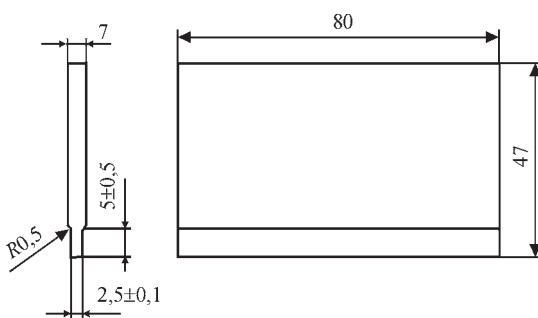


Рис. 2. Конфигурация фрагмента в месте приварки

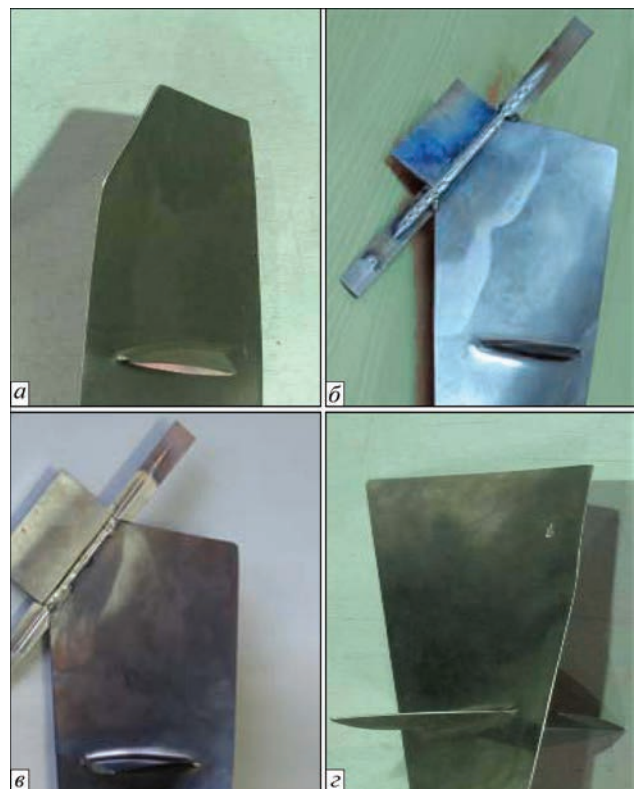


Рис. 3. Стадии выполнения ремонта лопатки: а — обрезка; б — ЭЛС; в — ТО; г — механическая обработка

Таблица 1. Режимы ЭЛС

Номер прохода	$v_{св}$, м/ч	$I_{св}$, МА	$I_{ф}$, МА	U , кВ	H , мм
Лицевая сторона (корыто); направление по точкам: 1-2-3-4-5					
1	60	14-18-22-22	630	60	220
Обратная сторона (спинка); направление по точкам: 5-4-3-2-1					
2	60	20-18-13-13	630	60	220

контролю. По результатам контроля дефектов не обнаружено.

Проведены усталостные испытания с определением σ_{-1} трех партий натуральных образцов лопаток (рис. 4):

– первая партия в количестве 8 шт. отобранных с разных двигателей, имеющих разную наработку и прошедших ремонт путем приварки фрагмента (сварных) (табл. 2). Разрушение образцов произошло при напряжении 280...340 МПа, отработав $N = 7,4 \cdot 10^6$ циклов;

– вторая партия в количестве 4 шт. отобранных с одного двигателя, имеющих наработку 3599 ч (цельных). Разрушение образцов произошло при напряжении 280...340 МПа, отработав $N = 7,4 \cdot 10^6$ циклов;

– третья партия в количестве 6 шт. отобранных с одного двигателя, имеющих наработку 5597 ч (цельных). Разрушение образцов произошло при напряжении 370 МПа, отработав $N = 7,4 \cdot 10^6$ циклов.

Испытания проводились при комнатной температуре и колебаниях по четвертой изгибной форме (при частоте порядка 1074 Гц), определенной ГП «Ивченко-Прогресс» для распределения наиболее интенсивных напряжений в зону ремонта.

Следует отметить, что из партии лопаток (сварных) были разрушены три образца, два из которых, индивидуальные (инд.) №№ 1502Ф и 1439Ф, имели одинаковую наработку и сняты с одного двигателя, несмотря на то, что разрушение их произошло при разном напряжении испытания (табл. 2). Отрицательное влияние на преждевременное разрушение образцов при испытаниях, вероятно, оказали крупнозернистая структура и дефекты, выявленные в

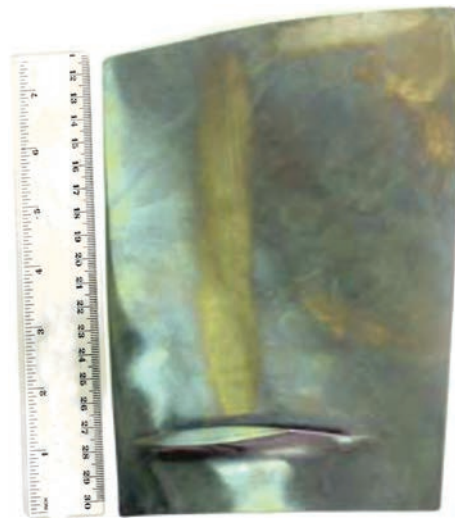


Рис. 4. Образец для усталостных испытаний

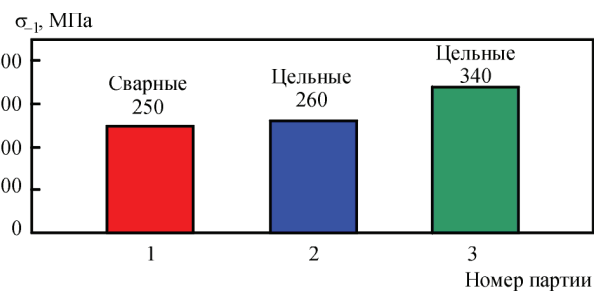


Рис. 5. Предел выносливости трех партий лопаток

сварном шве при металлографических исследованиях. Имеет место снижение σ_{-1} для первой партии лопаток сварных по отношению ко второй партии цельных, которое находится в пределах погрешности и составляет 10 МПа. Разница в σ_{-1} между второй и третьей партиями лопаток (цельных) составляет 80 МПа (рис. 5), что, вероятно, обусловлено неблагоприятным влиянием эксплуатационных факторов. Разрушение как сварных, так и цельных лопаток происходило однотипно, в верхней части кромки пера лопатки.

По результатам испытаний цельных образцов лопаток можно сделать вывод, что количество часов наработки и условия эксплуатации оказывают отрицательное влияние на σ_{-1} . Данный промежуточный этап был проведен с учетом, что данные по σ_{-1} лопаток, прошедших эксплуатацию, могут

Таблица 2. Результаты усталостных испытаний первой партии лопаток (сварных) с разной наработкой

Номер образца	Индивидуальный номер детали (инд.)	Нарботка СНЭ/ППР*, ч	Напряжение испытаний, МПа	Число циклов, $\cdot 10^6$	Примечание
1	815Я	8996/4192	340	0,22	Разрушилась
2	355А	3302/13181	310	20	Не разрушилась
3	1502Ф	3491/17767	310	0,57	Разрушилась
4	297Г	8996/4192	280	20	Не разрушилась
5	1439Ф	3491/17767	280	0,44	Разрушилась
6	431А	5684/17337	250	20	Не разрушилась
7	404Ж	2439	250	20	->-
8	915А	5684/17337	250	20	->-

* СНЭ — с начала эксплуатации; ППР — после последнего ремонта.



Рис. 6. Структурные изменения после сварки: *а* — участок с укрупненным зерном; *б* — разрушение сварного соединения

быть получены исключительно опытным путем. Для однозначного сравнения σ_{-1} необходимо проведение испытаний лопаток, отремонтированных путем приварки фрагмента, и цельных по серийной технологии с одинаковой наработкой (одного двигателя).

Для повышения эксплуатационных свойств деталей, восстановленных с применением сварки, предложена идея повышения σ_{-1} путем применения методов упрочнения поверхностного пластического деформирования (ППД) [5]. В связи со сложной геометрией и высокими требованиями к качеству поверхности технолог имеет в своем распоряжении очень ограниченную номенклатуру способов ППД [6]. Для возможности решения данной задачи одним из наиболее подходящих является «мягкий» метод упрочнения лопаток стальными шариками в магнитном поле, позволяющий повысить σ_{-1} сварных лопаток до уровня цельных. Предложенный способ упрочнения лопаток позволяет дифференцировано (избирательно), а также с разной интенсивностью обрабатывать отдельные участки пера лопатки [7].

Проведено металлографическое исследование мест разрушения лопаток после испытаний. Разрушение усталостного характера с очагами, расположенными на входной кромке в районе сварно-

го соединения. Трещины развивались по сварному шву с переходом в основной материал лопатки. В изломе лопаток на торце входной кромки выявлено наличие дефектов сварки типа внутренних раковин и микропор, величина которых не превышает допустимые требования для стандартных сварных соединений.

По результатам металлографического исследования лопаток с приваренным фрагментом определено, что воздействие термического цикла сварки и термообработки привело к укрупнению зерна (рис. 6).

Расположение мест разрушения на лопатках находится в среднем на расстоянии 4...5 мм от оси сварного шва, что совпадает с данными, полученными в работе по определению мест разрушения сварных образцов [8].

Исследование микроструктуры проводилось на микроскопе Zeiss Axio Observer при увеличении 50...500 раз. Вид макро- и микроструктуры зоны сварного шва показан на рис. 7, 8.

Материал шва имеет игольчатую структуру с крупными зернами первичной β -фазы (рис. 7, *а*; 8, *а*). В металле ЗТВ микроструктура представлена также крупными зернами β -фазы, с внутризерненным пластинчатым строением с переходом их к глобулярно-пластинчатой форме ($\alpha+\beta$)-фазе основного материала (рис. 7, *б-г*; 8, *б-г*). Микроструктура основного металла соответствует второму типу шкалы микроструктур № 1 ОСТ 1 90002-86.

Изломы по вскрытым трещинам лопаток серого оттенка, частично повреждены. По сохранившимся участкам и по макропризнакам — усталостного характера, с очагами, расположенными на входной кромке на расстоянии около 70...72 мм от верхнего торца лопаток в зоне шва ЭЛС с последующим фронтальным развитием от спинки на корыто (рис. 7). Проанализировав строение изломов, следует, что развитие трещин на лопатках

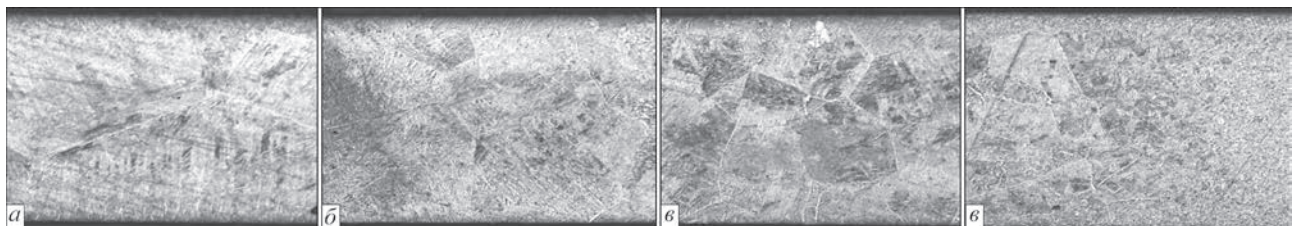


Рис. 7. Макроструктура ($\times 50$) зоны сварного шва лопатки: *а* — сварной шов; *б* — сварной шов + ЗТВ; *в* — ЗТВ; *г* — ЗТВ + основной металл

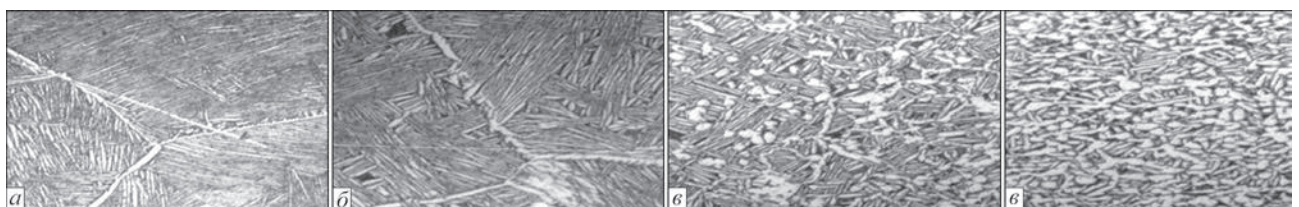


Рис. 8. Микроструктура ($\times 500$) зоны сварного шва лопатки: *а* — сварной шов; *б* — сварной шов + ЗТВ; *в* — ЗТВ; *г* — основной металл

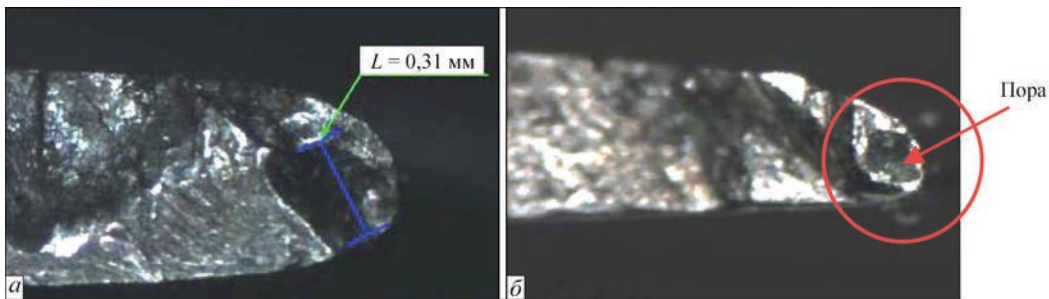


Рис. 9. Дефекты сварки типа внутренних раковин и микропор: а — инд. № 815Я ($\times 50$); б — инд. № 1502Ф ($\times 32$)

инд. № № 1502Ф и 1439Ф происходило по сварному шву на длину 7 и 9 мм, соответственно, о чем свидетельствует крупнозернистое строение, с последующим развитием по основному металлу с мелкозернистым строением. На лопатке инд. № 815Я развитие трещины происходило на длину 20 мм по зоне сварки без выхода в основной материал, о чем свидетельствует крупнозернистое строение излома. Следует добавить, что в изломе лопаток (инд. № 815Я, инд. № 1502Ф) на торце входной кромки выявлено наличие дефектов сварки типа внутренних раковин и микропор, величина которых допустима для стандартных сварных соединений (рис. 9).

Выводы

1. По результатам усталостных испытаний определено снижение σ_{-1} цельных лопаток, имеющих эксплуатационную наработку, что соответствует уровню σ_{-1} сварных лопаток.

2. При испытаниях лопаток с колебаниями по четвертой изгибной форме определено, что разрушение как сварных, так и цельных лопаток происходило однотипно в месте наибольших напряжений, сконцентрированных в верхней части входной кромки пера и совпало с частью траектории сварного шва фрагмента.

3. Траектория сварного шва должна быть расположена вне зоны действия максимальных напряжений. При этом должны быть учтены как четвертая изгибная форма, так и первая.

4. Основными направлениями в повышении σ_{-1} сварных лопаток могут быть:

- устранение микродефектов сварного шва, выявленных при металлографическом исследовании;
- опробование избирательного метода упрочнения стальными шариками в магнитном поле.

5. Учитывая разную наработку и недостаточное количество данных целесообразно продолжить проведение работ по ремонту лопаток вентилятора с последующим определением σ_{-1} лопаток, имеющих одинаковую наработку, снятых с одного двигателя Д-36.

Список литературы

1. Петрик И. А. (2007) *Процессы восстановления сваркой и пайкой лопаток газотурбинных двигателей из труд-*

носвариваемых сплавов на основе никеля и титана: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

2. Нестеренков В. М., Орса Ю. В., Хрипко К. С., Гусев Ю. В. (2017) Восстановительный ремонт элементов и узлов газотурбинных двигателей. *Автоматическая сварка*, **11**, 19–23.
3. Петрик И. А., Овчинников А. В., Басов Ю. Ф. и др. (2006) Повышение работоспособности лопаток из титановых сплавов вентилятора авиадвигателя. *Вестник двигателестроения*, **4**, 104–107.
4. Марченко Ю. А., Петрик И. А., Жеманюк П. Д. (2013) Отработка технологии электронно-лучевого отжига барабанов компрессора из титанового сплава ВТ8. *Промышленность в фокусе*, **4**, 42.
5. Сайдахмедов Р. Х. (2005) *Прогрессивные технологии производства конструкций летательных аппаратов из титановых сплавов*. Ташкент, ТГАИ.
6. Кротинов Н. Б. (2014) Поверхностное пластическое упрочнение лопаток газотурбинных двигателей. *Вестник СГТУ*, **3**, 68–71.
7. Пухальская Г. В., Коваль А. Д., Лоскутов С. В. и др. (2009) Влияние обработки лопаток компрессора шариками в магнитном поле на формирование параметров поверхностного слоя и прочностные характеристики. *Вестник двигателестроения*, **2**, 92–101.
8. Пухальская Г. В., Марков И. Б. (2016) Определение механических свойств в различных зонах сварных соединений из титанового сплава ВТ3. *Там же*, **1**, 89–91.

References

1. Petrik, I.A. (2007) *Processes of restoration repair by welding and brazing of gas turbine engine blades of difficulty weldable alloys based on nickel and titanium*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree, PWI [in Russian].
2. Nesterenkov, V.M., Orsa, Yu.V., Khripko, K.S. et al. (2017) Restoration repair of elements and units of gas turbine engines. *The Paton Welding J.*, **11**, 13-17.
3. Petrik, I.A., Ovchinnikov, A.V., Basov, Yu.F. et al. (2006) Improvement of operating capacity of titanium alloy blades of aircraft engine fan. *Vestnik Dvigatellestroeniya*, **4**, 104-107 [in Russian].
4. Marchenko, Yu.A., Petrik, I.A., Zhemanyuk, P.D. (2013) Mastering of technology of electron beam annealing of compressor drum from VT8 titanium alloy. *Promyshlennost v Fokuse*, **4**, 42 [in Russian].
5. Sajdakhmetov, R.Kh. (2005) *Advanced technologies for manufacture of flying vehicle structures from titanium alloys*. Tashkent, TGA1 [in Russian].
6. Krotinov, N.B. (2014) Surface plastic strain hardening of gas turbine engine blades. *Vestnik SGTU*, **3**, 68-71 [in Russian].
7. Pukhalskaya, G.V., Koval, A.D., Loskutov, S.V. et al. (2009) Effect of treatment of compressor blades by balls in magnetic field on formation of surface layer parameters and strength characteristics. *Vestnik Dvigatellestroeniya*, **2**, 92-101 [in Russian].
8. Pukhalskaya, G.V., Markov, I.B. (2016) Determination of mechanical properties in different zones of welded joints from VT3 titanium alloy. *Ibid.*, **1**, 89-91 [in Russian].

РЕМОНТ ВЕЛИКОГАБАРИТНЫХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГУНА

І. Б. МАРКОВ, І. А. ПЕТРИК, О. Г. СЕЛІВЕРСТОВ, Ю. А. МАРЧЕНКО

АТ «Мотор Січ». 69068, м. Запоріжжя, просп. Моторобудівників, 15. E-mail: motor@motorsich.com

Представлено результати робіт з відновлення пошкодженої ділянки лопатки вентилятора газотурбінного двигуна, шляхом приварювання фрагмента методом електронно-променевого зварювання. Визначено межу витривалості (σ_{-1}) лопаток вентилятора для двигуна Д-36 з тягою $16...65 \cdot 10^3$ Н, відремонтованих за даною технологією. Проведено металографічні дослідження лопаток з приварюванням фрагмента після втомних випробувань. Запропоновано перспективні напрямки з підвищення межі витривалості ремонтних лопаток вентилятора. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, титановий сплав, лопатки вентилятора, приварювання фрагмента, термообробка, структура, межа витривалості

REPAIR OF LARGE-SIZE BLADES OF FAN OF GAS-TURBINE ENGINE

I. B. MARKOV, I. A. PETRIK, A. G. SELIVERSTOV, Yu. A. MARCHENKO

JSC «Motor Sich», 15 Motorostroiteley Ave., Zaporozhye, 69068. E-mail: motor@motorsich.com

Paper presents the results of works on restoration of a damaged area of blade of gas turbine engine fan by means of welding-up of a fragment by electron-beam welding method. An endurance limit (σ_{-1}) was determined for fan blades of D-36 engine with $16-65 \cdot 10^3$ N thrust repaired by this technology. Metallographic examination of the blades with fragment welding-up after fatigue tests was carried out. Perspective directions on increase of the endurance limit of repair fan blades were proposed. 8 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: electron beam welding, titanium alloy, fan blades, fragment welding-up, heat treatment, structure, endurance limit

Поступила в редакцію 22.06.2018

Новые книги

Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – 642 с. ISBN 978-617-7015-74-0



Сборник включает 86 статей и докладов сотрудников отдела физики газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 1978–2018 гг. В нем обобщен сорокалетний опыт научно-исследовательской деятельности отдела в области теоретического исследования и компьютерного моделирования физических явлений, протекающих при дуговых, плазменных, лазерных и гибридных процессах сварки, наплавки и напыления покрытий. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами дуговой, плазменной, лазерной и гибридной сварки и обработки материалов, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы сварочных и родственных процессов.

Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Каталог інноваційних пропозицій цільової комплексної програми наукових досліджень «Ресурс». Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2018. – 65 с.



До каталогу інноваційних пропозицій увійшли 62 готових до впровадження нових розробок науковців, виконаних за Цільовою програмою НАН України з урахуванням нагальних потреб економіки держави. Вони виконані для підприємств і організацій сучасних галузей промисловості, будівництва та агропромислового комплексу.

*Заказы на сборник и каталог просьба направлять
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»*