

УДК 669.295:621.792.3

Канд. техн. наук А. В. Овчинников

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ИЗ СПЛАВА ВТЗ-1

Проведена экспериментальная апробация разработанного научно-практического подхода по восстановлению ответственных деталей ГТД из жаропрочных $\alpha + \beta$ - титановых сплавов на примере вентиляторных лопаток из сплава ВТЗ-1 двигателя Д-36. На основании результатов стендовых испытаний долговечности лопаток из сплава ВТЗ-1 установлено, что на долговечность восстановленных лопаток существенное влияние оказывает структура сварного шва. Применение СМК присадок опытного состава позволили формировать структуру сварного шва в сплаве ВТЗ-1 равноосного типа, близкую к структуре основного металла, и получить более качественные сварные швы. Это обеспечило повышение долговечности на 20 % в сравнении с лопатками, восстановленными по серийной технологии.

Ключевые слова: титановые сплавы, сварка, лопатка, механические свойства.

Лопатки вентилятора относятся к наиболее повреждаемым деталям ГТД. В большинстве случаев, их повреждения представляют собой забоины на входной кромке пера лопатки [1]. На сегодняшний день существуют технологии восстановления поврежденных лопаток, которые включают заварку забоин или варку вставок методами сварки плавлением [1, 2]. Методы сварки плавлением приводят к изменению структуры сварного шва жаропрочных титановых сплавов в зоне ремонта, что существенно снижает уровень механических свойств и не обеспечивает ресурс восстановленной детали на уровне исходной детали. Автором разработан материаловедческий подход, основные аспекты которого состоят в формировании механических свойств в поврежденных участках сложных деталей с учетом их напряженно-деформированного состояния (НДС), путем дифференцированного формирования структуры сварных швов, а также снижения дефектов сварного шва за счет применения присадочных материалов в принципиально новом субмикроструктурном состоянии. Результаты исследований, приведенные в работах [3, 4], позволили реализовать основные аспекты предложенного подхода. На основании экспериментальных исследований сварных образцов $\alpha + \beta$ - титановых сплавов и теоретических расчетов НДС лопатки двигателя Д-36 установлена возможность повышения механических свойств сварных соединений и расширения зон возможного ремонта лопатки. Настоящая работа направлена на экспериментальную апробацию разработанного научно-практического подхода на натуральных деталях — вентиляторных лопатках из сплава ВТЗ-1 дви-

гателя Д-36. Цель работы — повышение долговечности восстановленных лопаток с применением научно-практического подхода в сравнении с традиционными методами их восстановления.

Методика

В качестве объекта испытаний были выбраны лопатки вентилятора из сплава ВТЗ-1 газотурбинного двигателя Д-36.

Для реализации эксперимента использовались лопатки, снятые с эксплуатации по причине их повреждений. Сварку, механическую обработку и испытания проводили в условиях АО «Мотор Сич» в рамках хозяйственной работы (№ гос. регистрации 0109U008904). Испытания на натуральных лопатках выполнялись, согласно методике [5], на вибрационном стенде ВЭС-200 в соответствии с ГОСТ 25.502-79.

Для восстановления лопаток использовали аргонодуговую сварку (АДС) неплавящимся вольфрамовым электродом диаметром 1,8 мм на режимах $I_{св} = 180\text{А}$, $U_{св} = 10\text{В}$. Источник питания — ВД302, защитная среда — камера У6872-5306 с контролируемой атмосферой (аргоном). Применяли рекомендованный для сварки сплавов ВТЗ-1 присадочный материал в виде проволоки диаметром 1,8 мм из сплава ВТ20св (ГОСТ 27265-87). Согласно разработанному автором подходу, для обеспечения максимальной долговечности восстановленной лопатки необходимо использовать состав присадочных материалов, который формирует в сварном шве равноосный тип структуры. Поэтому согласно результатам ранее проведенных исследований [3] для присадочных

материалов использовали опытный состав титанового сплава: 3,0...4 % Al; 0,12...0,20 % La; 0,01...0,02 % Y; 0,01...0,03 % В; ост. Ti (патент Украины № 71627). Для снижения дефектов сварного шва титановые сплавы опытного состава подвергали ИПД для формирования в них специальной СМК структуры [6, 7].

Результаты исследований и их обсуждения

В качестве исходного варианта испытывали лопатки без повреждений с целью определения наиболее опасной зоны и величины их долговечности. Согласно результатам испытаний по четвертой изгибной форме при напряжении $\sigma_{max} = 285$ МПа (амплитуда в точки контроля $2A = 7,4$ мм) при частоте 1040Гц разрушение происходило при числе циклов $N = 7,4 \times 10^6$ выше антивибрационной полки. Для испытаний восстановленных лопаток необходимо было провести заварку участков лопатки с применением опытного состава и стандартных составов присадочных материалов. В наиболее напряженной зоне лопатки моделировали дефект в виде забоины. В качестве модельного дефекта выбраны наиболее частые повреждения на кромке лопатки в виде забоин [1]. При этом 70 % повреждений

имеют забоины глубиной 0,2...1,0 мм [2], а в ряде случаев их глубина может достигать 3 мм. Поэтому в качестве модельного дефекта выбрана забоина глубиной 3 мм, при этом толщина пера лопатки на такой глубине составляет около 2 мм. Место создания дефекта на пере лопатки выбирали таким образом, чтобы начало и последующее разрушение при приложенных нагрузках проходило по сварному шву. Согласно ранее проведенным исследованиям, наиболее нагруженной зоной лопатки является часть пера выше антивибрационной полки при условии, что нагружения прикладывают по четвертой изгибной форме (рис. 1, а).

После фрезерования забоины на торце лопатки, ее заваривали АДС, согласно технологической инструкции, действующей на предприятии с использованием двух составов присадочных материалов: опытный состав 3,6 %Al; 0,17 %La; 0,02 %В; 0,02 %Y и серийный состав проволоки из сплава ВТ20св (рис. 2).

После заварки выполняли шлифование, согласно действующим нормативным требованиям на предприятии, а сварные швы проходили люминесцентный контроль (рис. 3).

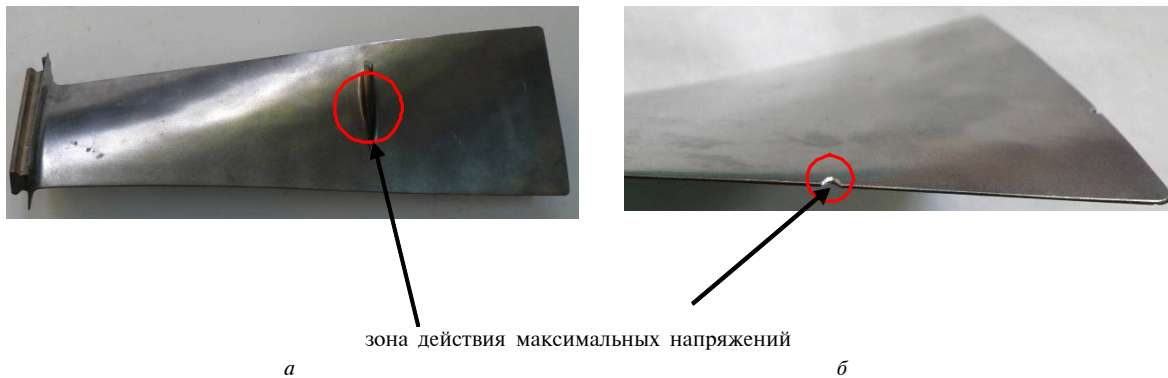


Рис. 1. Вид лопатки с нанесенным дефектом в виде забоины:

а – вид исходной лопатки; б – перо лопатки с модельным дефектом



Рис. 2. Вид лопатки после заварки забоины АДС:

а – лопатка с моделированными дефектами; б – надпочечная часть лопатки после заварки моделированных дефектов

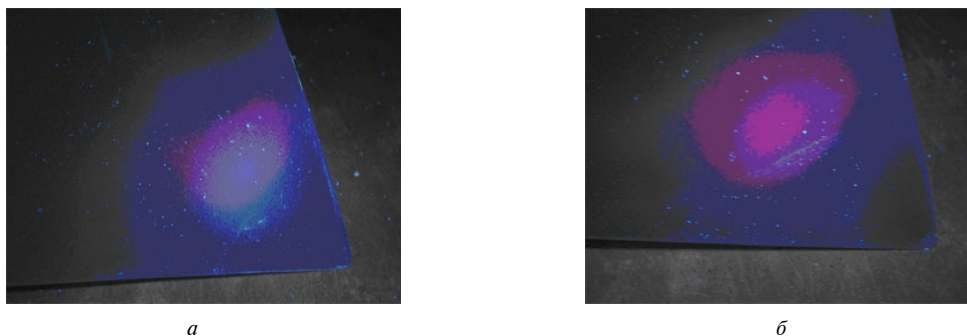


Рис. 3. Вид восстановленной лопатки методом АДС при люминесцентном излучении:

a – лопатка восстановленная с применением присадки опытного состава; *б* – лопатка восстановленная с применением присадки из сплава BT20

Как следует из приведенных данных сварные швы, полученные как опытной присадкой, так и присадкой стандартного состава не имели дефектов, которые могли бы оказать влияние на долговечность лопаток.

После окончательной механической обработки образцов, вырезанных из лопаток, проводили термическую обработку по технологии: отжиг: 840 °С в течение 1 часа. Результаты стендовых испытаний на долговечность по четвертой форме колебаний восстановленных лопаток приведены в таблице 1.

Как следует из анализа представленных данных, лопатки, восстановленные с применением опытного состава, имели долговечность близкую к долговечности исходных лопаток. При этом, долговечность лопаток, восстановленных с применением присадки состава BT20св, в среднем на 20 % ниже, чем долговечность лопаток, восстановленных с применением опытных присадок. Начало разрушения у всех лопаток происходило практически в одной зоне (рис. 4). Это можно

объяснить максимальными напряжениями в этом участке лопатки для конкретных условий нагружения. При продолжении испытаний до разрушения лопаток установлено, что поверхность разрушения для всех лопаток имела вязкий усталостный характер (рис. 4, 5). В лопатках, полученных с применением присадки BT20св, вид разрушения имел менее равномерный характер, в котором прослеживались элементы развития трещины. Это, по-видимому, являлось следствием меньшей пластичности сварного шва, полученного присадкой BT20св.

В результате соприкосновения и трения при вибрационных испытаниях, образованных при разрушении поверхностей фрактограммы, имели нечеткий вид. Это усложнило анализ при высоких увеличениях характера развития трещины по структурным составляющим (рис. 5). Наиболее информативными являлись дефекты поверхности разрушения в виде пор и несплошностей. В частности, на поверхности исходных лопаток не обнаружены участки хрупкого разрушения или поры (см. рис. 5, *a*).

Таблица 1 – Долговечность лопаток из сплава BT3-1, восстановленных методами АДС с присадочными материалами различного состава

Материал присадки	Долговечность до образования трещины, цикл	Отношение долговечности сварной лопатки $N_{св}$ к долговечности исходной лопатки ($N = 7,4 \cdot 10^6$ при $\sigma_{max} = 285$ МПа)
BT20 св	$5,7 \times 10^6$	0,78
3,6 %Al; 0,17 %La; 0,02 %В; 0,02 %Y в СМК состоянии	$7,4 \cdot 10^6$	1



Рис. 4. Характерный вид разрушения лопаток после испытаний по четвертой изгибной форме

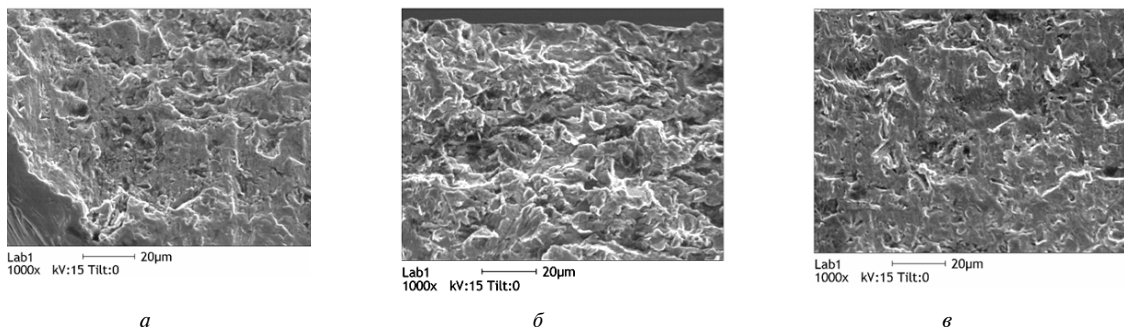


Рис. 5. Фрактограммы разрушения лопаток:

a – исходная лопатка; *б* – восстановленная лопатка с применением присадки состава ВТ20св; *в* – восстановленная лопатка с применением присадки опытного состава

Для лопаток, полученных с применением СМК присадок опытного состава, данные дефекты практически отсутствовали (см. рис. 5, *в*), а отдельные поры размером менее 5 мкм практически не оказывали влияние на характер разрушения. Для лопаток, полученных с применением присадок состава ВТ20св, имели место поры размером до 15 мкм (см. рис. 5, *б*). Данные дефекты, согласно ранее приведенным результатам исследований, являлись следствием несовершенства структуры присадочных материалов (поры, химическая неоднородность). Таким образом, на долговечность восстановленных лопаток основное влияние оказывает структура сварного шва. В свою очередь, применение СМК присадок опытного состава позволили формировать структуру сварного шва в сплаве ВТ3-1 равноосного типа, близкую к структуре основного металла, и получить более качественные сварные швы, что обеспечило долговечность восстановленных лопаток на уровне исходных.

В целом, испытания, проведенные на натуральных лопатках, подтвердили основные положения материаловедческого научно-практического подхода восстановления сложных деталей из жаропрочных $\alpha + \beta$ - титановых сплавов.

Выводы

1. Проведена экспериментальная апробация разработанного научно-практического подхода по восстановлению вентиляторных лопаток ГТД из жаропрочных $\alpha + \beta$ - титановых сплавов (сплав ВТ3-1) авиационного двигателя Д-36.

2. На основании результатов стендовых испытаний долговечности лопаток из сплава ВТ3-1 установлено, что на долговечность восстановленных лопаток основное влияние оказывает структура сварного шва. В свою очередь, применение СМК присадок опытного состава позволило формировать структуру сварного шва в сплаве ВТ3-1 равноосного типа, близкую к структуре основного металла и получить более качествен-

ные сварные швы. Это обеспечило повышение долговечности на 20 % в сравнении с лопатками, восстановленными по серийной технологии и обеспечило долговечность исходных лопаток.

Список литературы

1. Восстановительный ремонт лопаток компрессора и вентилятора методом варки вставок. / Г. Б. Строганов, Б. Е. Карасев, Ю. В. Полоскин // Авиационная промышленность. – 1978. – № 2. – С. 24–28.
2. Использование сварных технологий при изготовлении и ремонте ГТД / [Ю. С. Елисеев, Ю. Б. Мошкин, В. А. Поклад и др.] // Авиационная промышленность. – С. 12–15.
3. Овчинников А. В. Формирование структуры в сварных швах жаропрочных титановых сплавов путем модифицирования / А. В. Овчинников // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. трудов – Дн-вск, 2012. – Вып. 64. – С. 359–366.
4. Овчинников А. В. Применение субмикроструктурных титановых сплавов для ремонта методами сварки деталей авиадвигателей / А. В. Овчинников // Автоматическая сварка. – 2012. – №2 (706). – С. 21–25.
5. Богуслав В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслав, В. К. Яценко, В. О. Притченко. – К., 1993. – 333 с.
6. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / [Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков.]. – Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. – 87с.
7. Пат. № 46999 Украина. Способ упрочнения материала и устройство для его осуществления / Сынков С. Г., Варюхин В. Н., Сынков В. Г. и др.; заявитель и патентообладатель Дон ФТИ НАН Украины. – заявл. 12.04.2001; опубл. 15.05.2001.

Поступила в редакцию 22.02.2013

Овчинников О.В. Використання матеріалознавчого підходу для відновлення лопаток вентилятору зі сплаву BT3-1

Проведено експериментальну апробацію розробленого науково-практичного підходу по відновленню відповідальних деталей ГТД з жароміцних $\alpha + \beta$ - титанових сплавів на прикладі лопаток вентилятору зі сплаву BT3-1 двигуна Д-36. На підставі результатів стендових випробувань довготривалості лопаток із сплаву BT3-1 встановлено, що на довговічність відновлених лопаток істотно впливає структура зварного шву. Вживання СМК присадок дослідного складу дозволили формувати структуру зварного шву в сплаві BT3-1 рівновісного типу, близьку до структури основного металу, і отримати якісніші зварні шви. Це забезпечило підвищення довготривалості на 20% порівняно з лопатками, відновленими за серійною технологією.

Ключові слова: титанові сплави, зварювання, лопатка, механічні властивості.

Ovchinnikov A. Application of materials scientific approach for restoration of fan blades made of BT3-1 alloy

The devised scientific and practical approach to restoring GTD critical parts made of high-temperature $\alpha + \beta$ - titanium alloys was tested experimentally. For testing use was made of fan blades of Д-36 engine made of BT3-1 alloy. Bench tests of durability of BT3-1 alloy blades showed that weld structure has significant effect on blades life. Use of СМК additives with experimental composition enabled to form weld structure of equiaxial type, close to that of basic metal, and to improve welds quality. The above approach made it possible to increase durability by 20% as compared with blades restored in accordance with serial technology.

Key words: titanium alloys, welding, blade, mechanical properties.