

УДК 621.791.011

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290818.41.90

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РОТОРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДАМИ СВАРКИ

СЕЛИВЕРСТОВ А. Г.<sup>1</sup>, канд. техн. наук,

ЛАУХИН Д. В.<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.

<sup>1</sup>АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина

<sup>2</sup>Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы ремонта ответственных деталей газотурбинных двигателей с применением методов сварки. На основе созданной твердотельной модели детали расчетным путем определены действующие напряжения. Разработан технологический процесс восстановления геометрии детали с обеспечением свойств на уровне действующих нагрузок. **Цель работы:** разработка оптимальной технологии восстановления геометрии ответственных деталей с применением методов сварки.

**Ключові слова:** газотурбинний двигател; технологія відновлення геометрії деталі

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ РОТОРНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ МЕТОДАМИ ЗВАРЮВАННЯ

СЕЛИВЕРСТОВ А. Г.<sup>1</sup>, канд. техн. наук,

ЛАУХИН Д. В.<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.

<sup>1</sup>АТ «МОТОР СИЧ», Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

**Анотація.** Розглянуто питання ремонту відповідальних деталей газотурбінних двигунів із застосуванням методів зварювання. На основі створеної твердотільної моделі деталі розрахунковим шляхом визначено діючі напруги. Розроблено технологічний процес відновлення геометрії деталі із забезпеченням властивостей на рівні діючих навантажень. **Мета роботи:** розроблення оптимальної технології відновлення геометрії відповідальних деталей із застосуванням методів зварювання.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун; технологія відновлення геометрії деталі

## THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE RESTORATION OF ROTOR PARTS FROM TITANIUM ALLOYS BY WELDING METHODS

SELIVERSTOV A. H., *Cand. Sc. (Tech.), Prof. assistant*

LAUKHIN D. V., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1</sup>MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine

<sup>2</sup>Department of Material Science and Treatment of Materials, State Higher Educational Establishment «Pridneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24<sup>A</sup>, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

**Abstract.** The article deals with the repair of critical parts of gas turbine engines using welding methods. On the basis of the created solid model of the part, the acting stresses are determined by calculation. The technological process of restoring the geometry of the part has been developed, with the provision of properties at the level of the existing loads. **The purpose of the work:** development of the optimal technology for restoring the geometry of critical parts using welding methods.

**Keywords:** gas turbine engines; technology for restoring the geometry

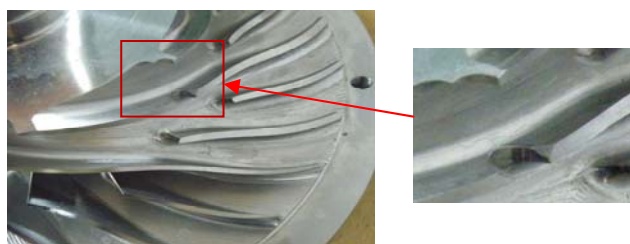
**Постановка проблеми.** Для изготовления высоконагруженных роторных деталей компрессора современных авиационных двигателей применяются в основном жаропрочные двухфазные титановые сплавы, например, ВТ8, ВТ9, ВТ3-1, ВТ-25У и др. На многих двигателях последних поколений детали компрессора изготовлены в виде моноколес. При этом улучшаются многие параметры деталей:

снижение веса, уменьшение габаритов, повышение надежности ответственных деталей и узлов, что в итоге приводит к повышению эффективности двигателей в целом [1]. Однако известен и ряд недостатков для данных конструкций деталей. Наиболее существенные – высокая стоимость, сложная ТП изготовления, а также ограниченные возможности ремонта поврежденных.

Повреждение деталей возможно как при эксплуатации, так и в процессе изготовления деталей. Поломка инструмента, сбой станка, ошибка оператора приводят к возможному образованию дефектов в заготовках моноколес, таких как зарезы, отклонения геометрии и т. п.



Рис. 1. Внешний вид моноколеса на стадии механической обработки



Дефект «зарез»

Рис. 2. Внешний вид характерных дефектов

При выборе технологии восстановления необходимо учитывать, что моноколеса имеют сложную конструкцию, криволинейные поверхности с значительными перепадами толщин элементов, но по всему сечению заготовка моноколеса имеет одинаковую структуру.

Механические свойства основного материала детали находятся на уровне 1 100...1 200 МПа [2]. При этом в процессе работы в различных участках моноколеса возникают различные по величине нагрузки. Поэтому в разрабатываемой технологии восстановления кроме получения заданной геометрии детали должен быть обеспечен определенный уровень свойств.

Исследование дефектов мехобработки возможно выполнить методами сварки или наплавки. В настоящее время известны и применяются различные способы сварки – лазерная, электроннолучевая, дуговая в защитных газах и т. д., с автоматизированным управлением или ручная, с применением в качестве присадочного материала порошка или проволоки с требуемым химическим составом.

Таким образом, **цель** настоящей работы заключалась в разработке оптимальной технологии восстановления поврежденных моноколес при мехобработке.

В данном случае, для восстановления детали – моноколеса с конкретными дефектами, полученными в процессе мехобработки – был выбран один из наиболее простых и универсальных методов – ручная аргонодуговая сварка.

Однако известно, что в процессе сварки воздействие термического цикла приводит к изменению структуры материала детали и снижению механических свойств [3].

Соответственно, для определения принципиальной возможности восстановления, а также пригодности выбранного метода восстановления для конкретной детали необходимо определить фактический уровень свойств в месте сварки и сравнить с нагрузками, которые возникают в процессе работы.

Определение механических свойств сварных соединений выполняли на образцах. Для изготовления образцов использовали остатки материала заготовок моноколес, из которых путем механической обработки были получены плоские образцы, тип XII по ГОСТ 6996-66, с последующей сваркой. Присадочную проволоку

применяли стандартную для сварки титановых сплавов.

Сварку выполняли по следующей технологии:

защитная среда - вакуумная камера, заполненная аргоном;

источник питания ВД-302;

сварочный ток 70-180 А;

марка присадочной проволоки ВТ-20, ОТ4-1, ВТ1-00;

диаметр присадочной проволоки 1,6...2,0 мм.

Внешний вид сварного шва со снятым усилением, а также микроструктуры сварного шва по сравнению с основным металлом типичного образца для механических испытаний приведен на рисунке 3.

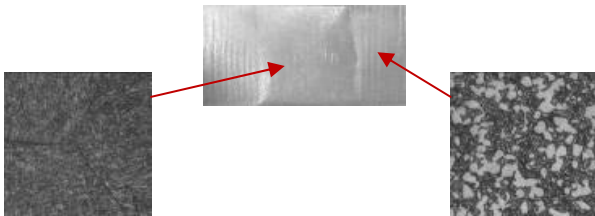


Рис. 3. Внешний вид и микроструктура сварного шва по сравнению с основным металлом

Результаты механических испытаний приведены в таблице.

Таблица

**Результаты испытаний механических свойств сварных соединений / Results of tests of mechanical properties of welded joints**

Марка присадочной проволоки	Механические свойства	
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
ВТ-20	900	7,5
ОТ4-1	750	11
ВТ1-00	500	17

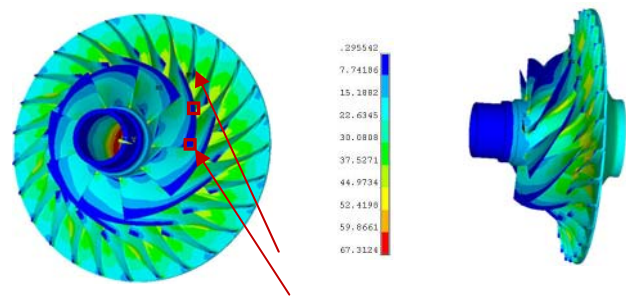
После определения фактического уровня механических свойств в месте сварки необходимо определить уровень нагрузок, действующих в местах предполагаемого ремонта в процессе работы моноколеса, для чего необходимо построить модель моноколеса, выполнить расчеты и определить уровень действующих нагрузок.

Соответственно, сравнивая величину нагрузки и уровень свойств в месте предполагаемого ремонта, возможно определить принципиальную допустимость проведения ремонта и выбрать оптимальную технологию, материалы и т. д.

Определение действующих нагрузок в моноколесе и в местах повреждений выполняли в программе «ANSYS» [4].

Так как дефекты в процессе мехобработки получены на заготовке моноколеса, которая значительно отличается по форме и размерам от окончательно обработанной детали, для расчетов принимали форму и размеры окончательно обработанной детали.

Результаты расчетов с указанием мест сварки приведены на рисунке 4.



Места расположения сварных швов

Рис. 4 Результаты расчета нагрузок для моноколеса

В результате расчетов установлены наиболее нагруженные зоны при работе моноколеса. К областям с наибольшими напряжениями относятся места вблизи радиусов перехода от лопаток к ступице моноколеса.

Дефекты типа «зarez», полученные в заготовке моноколеса, после окончательной обработки детали будут расположены в областях с низким уровнем действующих при работе детали напряжений, менее 20 МПа.

В соответствии с результатами механических испытаний сварных соединений (см. табл.), максимальная величина механических свойств, наиболее близкая к уровню механических свойств основного металла, обеспечивается при

варианте наплавки с применением присадочной проволоки ВТ 20. Таким образом, для восстановления повреждений моноколеса в виде зарезов выбран вариант – сварка АДС, с применением присадочной проволоки ВТ 20.

Восстановление моноколеса выполняли по следующей технологии:

Подготовка под сварку.

- механическая зачистка поверхности, удаление заусенцев, резких уступов и т. д;
- обезжиривание детали и сварочной проволоки.

Сварки АДС выполняли в вакуумной камере, заполненной аргоном на следующих режимах:

- источник питания ВД-302;
- сварочный ток 50-120А;
- марка присадочной проволоки - ВТ-20;
- диаметр присадочной проволоки 1,6...2,0 мм.



Рис. 5. Внешний вид моноколеса после восстановления

Качество восстановленных мест проверяли визуальным осмотром и люминесцентным контролем ЛЮМ1-ОВ. При этом установлено, что недопустимые металлургические дефекты в виде трещин,

несплавлений, раковин и включений, а также недопустимого окисления поверхности сварного шва и основного металла в местах наплавки отсутствуют.

Внешний вид детали после восстановления представлен на рисунке 5, места заварки дефектов показаны стрелками.

Таким образом, разработана технология восстановления методами сварки повреждений заготовки моноколеса, возникающих на стадии изготовления в процессе мехобработки.

**Выводы:** 1. Построена модель распределения напряжений. Расчетным путем определены действующие напряжения. Установлены наиболее нагруженные зоны при работе моноколеса. К областям с наибольшими напряжениями относятся места вблизи радиусов перехода от лопаток к ступице моноколеса.

2. Дефекты типа «зарез», полученные в конкретной заготовке моноколеса, после окончательной обработки детали будут расположены в областях с низким уровнем действующих при работе детали напряжений.

3. Максимальная величина механических свойств, наиболее близкая к уровню механических свойств основного металла, обеспечивается при варианте наплавки с применением присадочной проволоки ВТ 20.

4. По результатам исследования разработана технология восстановления повреждений моноколеса, выполнено восстановление реальной детали.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок : в 3 т. / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. – Москва : Машиностроение, 2007. – Т. 2 : Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. – 396 с.
2. Горынин И. В. Титан в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. – Москва : Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / Гуревич С. М., Замков В. Н., Блащук В. Е. и др. – 2-е изд., доп. и перераб. – Киев : Наук. думка, 1986. – 240 с.

4. Селіверстов О. Г. Підвищення властивостей зварних з'єднань роторних деталей ГТД з титанового сплаву VT8 : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.01 / Селіверстов Олександр Георгійович. – Запоріжжя, 2016. – 20 с.

## REFERENCES

1. Inozemcev A.A. Nixamkin M.A. and Sandrackij V.L. *Gazoturbinnye dvigateli. Osnovy konstruirovaniya aviatsonnykh dvigatelej i energeticheskix ustanovok: v 3 t.* [Gas turbine engines. Fundamentals of the design of aircraft engines and power plants: in 3 volumes]. *Kompressory. Kamery sgoraniya. Forsazhnye kamery. Turbiny. Vychodnye ustrojstva* [Compressors. Combustion chambers. Afterburners. Turbines. Output Devices]. Moskva: Mashinostroenie, 2007, vol. 2, 2007, 396 p. (in Russian).
2. Gorynin I.V. and Chechulin B.B. *Titan v mashinostroenii* [The Titan in the mechanical engineering]. Moskva: Mashinostroenie, 1990, 400 p. (in Russian).
3. Gurevich S.M., Zamkov V.N., Blashchuk V.E. and others. *Metallurgiya i tekhnologiya svarki titana i ego splavov* [Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys]. Kiev: Nauk. dumka, 1986, 240 p. (in Russian).
4. Seliverstov O.G. *Pidvyshchennia vlastyvostei zvarnykh ziednan rotornykh detalei GTD z tytanovoho splavu VT8: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.01* [Improvement of the properties of welded joints of rotor parts of the GTE from the titanium alloy VT8: author's abstract. of Cand. Sc. (Tech.) dissertation: specialty 05.02.01]. Zaporizhzhia, 2016, 20 p. (in Ukrainian).

*Рецензент: Большаков В. И., д-р техн. наук, проф.*

Надійшла до редколегії: 18.01.2018 р.