

# ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ЛОПАТОК В СОСТАВЕ МОНОКОЛЕСА

Филиал "НИИД" ФГУП "НПЦ газотурбостроения "Салют":  
**Валерий Александрович Гейкин**, директор, профессор, д.т.н.  
**Евгений Олегович Фомичев**, начальник лаборатории "Системы управления"

*Разработан способ восстановления лопатки моноколеса газотурбинного двигателя с помощью электронно-лучевой сварки. Проведены металлографические исследования сварного соединения.*

*The way of restoration of a blade of a blisk of the gas-turbine engine by means of electron beam welding is developed. Metallographic researches of welded connection are conducted.*

**Ключевые слова:** ремонт моноколеса, электронно-лучевая сварка, вставка.

**Keywords:** blisk repair, electron beam welding, insert.

Был предложен способ, основанный на работе [1], ремонта лопаток компрессора в составе моноколеса, схема которого приведена на рис. 1.

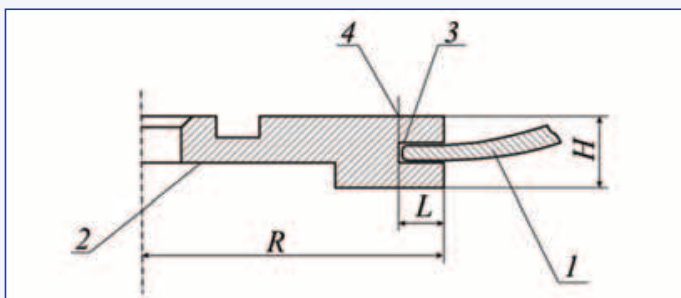


Рис. 1. Схема ремонта лопаток компрессора методом электронно-лучевой сварки: 1 - перо лопатки; 2 - вставка; 3 - паз для пера лопатки; 4 - риска для наведения электронного луча на стык

Способ восстановления пера лопаток компрессора газотурбинного двигателя заключается в выполнении на поврежденном участке цилиндрической выемки с центром вне площади профиля пера, соединении вставки с пером лопатки в зоне цилиндрической выемки, приварки электронным лучом вставки 2 к перу лопатки 1 и последующей механической обработке пера лопатки. Вставка имеет форму полудиска с торцевым пазом 3 и рисккой 4, нанесенной на верхнюю часть вставки для наведения электронного луча на стык на диаметре, равном  $2(R - L)$ , где  $R$  - радиус вставки,  $L$  - глубина паза. При этом соединение вставки с пером лопатки осуществляли на глубине паза вставки. Внешний вид рабочих лопаток с приваренной вставкой к одной из них методом ЭЛС показан на рис. 2.

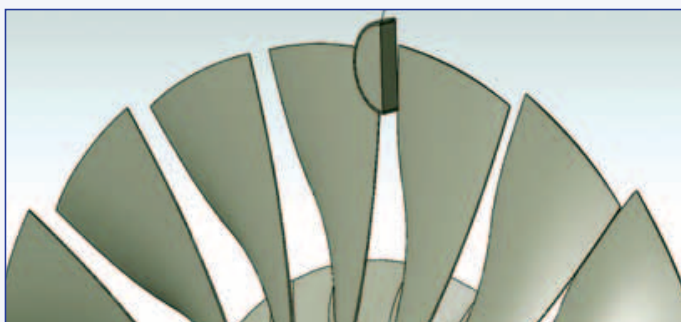


Рис. 2. Внешний вид лопатки моноколеса с вставкой

Перо лопатки имеет переменную толщину и для обеспечения полного проплавления вначале предполагалось, что в процессе сварки необходимо будет менять параметры сварочного цикла. Однако проведенная серия экспериментов показала возможность подбора такого режима сварки, который способен обеспечить получение качественного соединения на данном изделии без изменения каких-либо параметров.

Исследования проводились на образцах из сплава ВТ-6. Сварку вели горизонтальным лучом в горизонтальной плоскости,

так как указанный способ обеспечивает лучшие условия качественного формирования сварных швов.

Во всех проводимых экспериментах ускоряющее напряжение было постоянным и равнялось 60 кВ. Значение скорости сварки, обеспечивающее получение качественного сварного соединения, определяется, с одной стороны, условием минимальной интенсивности гидродинамических возмущений в ванне, а с другой - условием минимальной ширины шва для снижения деформаций, повышения трещиностойкости, сохранения концентрации легкоиспаряющихся легирующих элементов в металле шва. Первое условие требует уменьшения скорости сварки, а второе - ее повышения. Исследование влияния различных скоростей сварки на качество формирования и глубину сварного шва показало, что для сплава ВТ-6 толщиной 10...20 мм скорость сварки должна составлять  $V_{св} = 30$  м/ч. Ток сварки  $I_{св}$  влияет на толщину проплавления практически линейно, а наибольшее влияние на качество формирования сварного шва оказывает ток магнитной фокусирующей линзы  $I_{ф}$ . Для рассматриваемого варианта, обеспечивающего максимальное проплавление, изменения тока луча должно быть в диапазоне от 20 до 100 мА, что незначительно влияет на форму и размеры швов. Во всех случаях при токе фокусирующей линзы, обеспечивающем максимальное проплавление, угол сходимости стенок швов должен находиться в пределах  $2...4^\circ$ . Но при этом ухудшается внешнее формирование шва, имеет место разбрызгивание металла.

Обработка и анализ экспериментальных данных позволили подобрать параметры, обеспечивающие получение качественного стыка по всей длине на режимах: ускоряющее напряжение 60 кВ; ток луча 25 мА; ток фокусировки 400 мА; скорость сварки 30 м/ч; расстояние до детали 354 мм; сварка ведется на подкладках с последующим удалением усиления и корневой части шва.

Учитывая, что рассматриваемые элементы в реальных условиях эксплуатации испытывают значительные нагрузки, то после отработки технологии на сваренных контрольных образцах необходимо было провести полный комплекс исследований по определению остаточного напряженно-деформированного состояния, механических свойств полученного сварного соединения, макро- и микроисследования, а также натурные испытания в составе технологического двигателя.

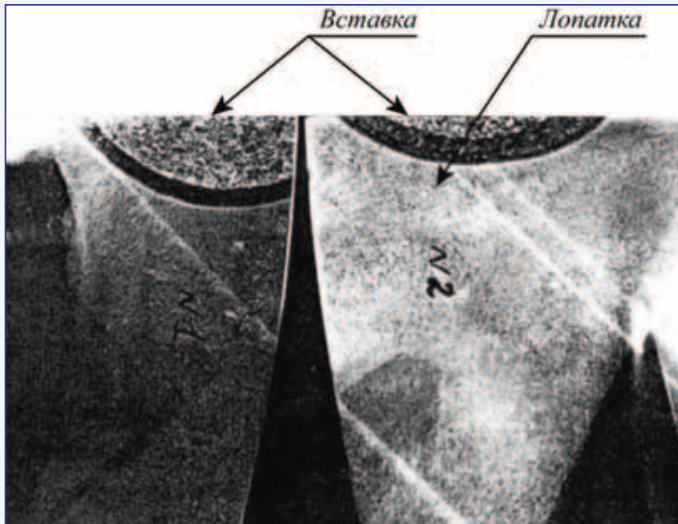
После термомеханического цикла сварки в конструкции возникает остаточное напряжение, близкие к пределу текучести материала, которые суммируясь с рабочими ускоряют процесс накопления повреждаемости металла, и способствуют его разрушению. Для снижения уровня остаточных напряжений после сварки отремонтированное изделие подвергают полному отжигу при температуре  $620 \pm 10^\circ\text{C}$  в течение 2 ч.

Все экспериментальные лопатки проходили радиографический контроль и цветную дефектоскопию, которые подтвердили высокое качество сварных швов по всей длине.

Проведенные механические испытания подтвердили соответствие полученных свойств сварных соединений предъявляемым требованиям. Так, уровень механических свойств сварных соеди-

нений составляет:  $\sigma_B > 1105,0$  МПа,  $\sigma_{0,2} > 1090,0$  МПа,  $\delta = 14\%$ ,  $\psi = 44,0\%$ ,  $KCU = 245$  кДж/м<sup>2</sup>.

Металлографические исследования показали, что качество металла сварных швов удовлетворительное, дефектов не обнаружено. Макроструктура металла лопаток в зоне наплавки (рис. 3) соответствует 3 баллу, а вне зоны - 1...2 баллу по десятибалльной шкале.



**Рис. 3. Макроструктура металла лопаток после электронно-лучевой сварки вставок и механической обработки**

Во избежание разнородности металл вставки необходимо подбирать с зерном не крупнее третьего балла.


С помощью предложенного способа были отремонтированы 52 лопатки моноколеса, которые успешно выдержали длительные испытания в составе технологического двигателя.

Удаленный дефектный участок должен охватывать максимальное количество дефектов, расположение которых устанавливает-

ся в результате обработки статистических данных; расположение ремонтного сечения должно удовлетворять статистическим и вибрационным нормам прочности. На рис. 4 показан внешний вид рабочего моноколеса компрессора низкого давления (КНД) после ремонта лопаток методом сварки входной кромки. Изучение распределения дефектов по профилю пера лопаток рабочего колеса показало, что более всего повреждается входная кромка, поэтому



**Рис. 4. Внешний вид рабочего моноколеса КНД после ремонта лопаток методом ЭЛС**

выбор места расположения ремонтных сечений на входной кромке должен охватывать практически все эксплуатационные дефекты пера при минимальном количестве ремонтных сечений. 

#### Литература

1. Патент России на изобретение №2185945 В23 Р6/00/ Мошкин Ю.Б., Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Гейкин В.А., Редчиц В.В., опубли. 12.03.2001.

Связь с автором: e-mail: [fomitch@gmail.com](mailto:fomitch@gmail.com)