

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТНОЙ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ ТОРЦОВ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТВД АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО, В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук,  
**А. В. ЯРОВИЦЫН, А. А. НАКОНЕЧНЫЙ, Г. Ф. НАСТЕНКО**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины),  
**В. Е. ЗАМКОВОЙ, О. С. БЕЛОЗЕРЦЕВ, Н. В. АНДРЕЙЧЕНКО**, инженеры  
(ЗМКБ «Прогресс» им. А. Г. Ивченко, г. Запорожье)

Описана разработанная в ИЭС им. Е.О. Патона технология ремонтной микроплазменной порошковой наплавки торцов бандажных полок рабочих лопаток турбины высокого давления из сплава ЖС32-ВИ двигателя Д18Т с использованием присадочного порошка, однородного основному металлу. Показано, что в однослойном наплавленном металле сохраняется преимущественное наследование структуры основного металла. Установлено, что образцы, имитирующие условия ремонтной наплавки, при испытаниях на длительную прочность при температуре 1000 °С имеют вдоль линии сплавления уровень равнопрочности относительно основного металла около 50 %.

*Ключевые слова:* микроплазменная порошковая наплавка, рабочие лопатки ТВД, жаропрочный никелевый сплав, торцы бандажных полок, наследование структуры, длительная прочность

В последние годы в связи с растущими объемами заказов на авиационные перевозки крупногабаритных нестандартных грузов возник дефицит авиационного парка транспортных рамповых самолетов, имеющих сертифицированные за рубежом авиационные двигатели. Стало актуальным продление ресурса эксплуатации самолета АН-124 «Руслан», оснащенного двигателем последнего поколения Д18Т [1], с 24 до 40 тыс. летных ч, что увеличит срок эксплуатации самолета до 30...32 лет [2]. Для этого, в частности, необходимо продление ресурса рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД), имеющих значительные наработки.

На поступающих в ремонт рабочих лопатках из сплава ЖС32-ВИ, кроме эксплуатационного износа торцов и боковых стенок бандажных полок, обнаруживаются термоусталостные трещины. Ввиду увеличения эксплуатационных повреждений на проточной поверхности бандажных полок рабочих лопаток ТВД двигателя Д18Т (ЗМКБ «Прогресс») принято решение усовершенствовать применяемую ранее технологию их восстановления методом аргонодуговой наплавки [3, 4].

Технологические задачи, которые ставились при ремонте проточной поверхности верхней бандажной полки рабочих лопаток ТВД из сплава ЖС32-ВИ, были следующие:

- восстановление торцов бандажной полки на высоту до 2,5 мм, а при наличии термоусталостных трещин — на высоту до 4...5 мм после механического удаления поврежденных участков лопаток;
- утолщение бандажной полки до регламентированной чертежом лопатки толщины 1,5 мм в зоне ремонтной наплавки;
- ограничение температуры послесварочной термообработки до 1050 °С с целью сохранения функциональных свойств термозащитного диффузионного покрытия СДП-2 на неремонтируемых зонах лопатки.

Задача ремонта сильно поврежденных торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД из жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ (химический состав, мас. %: 0,15 С; 5 Cr; 9,3 Со; 2–10 W; 0,5–5,0 Мо; 4,5–8,0 Al; 1,5–5,0 Nb; 4 Re; 4 Та; 0,01–0,03 В) с направленной кристаллизацией и содержанием  $\gamma'$ -фазы 62 % [5] была успешно решена с помощью микроплазменной порошковой наплавки с использованием однородного основному металлу присадочного порошка.

Порошок из сплава ЖС32-ВИ был получен методом сухого распыления слитка в атмосфере аргона. Для микроплазменной ремонтной наплавки торцов бандажных полок использовали порошок фракции 63...160 мкм (согласно ГОСТ 6613–86), которая составляла около 30...40 % первоначальной массы распыленного слитка. Применительно к ремонтной микроплазменной порошковой наплавке жаропрочного дисперсионно-твердеющего спла-

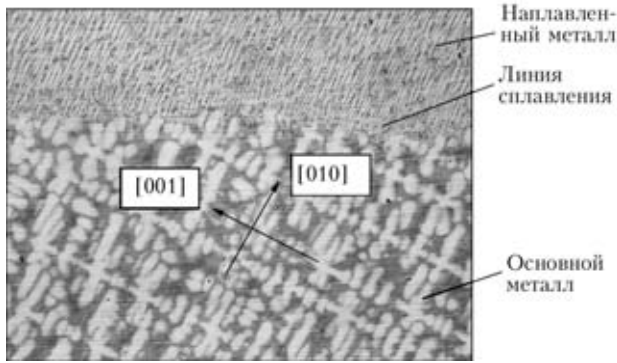


Рис. 1. Микроструктура (X50) линии сплавления при однослойной наплавке порошком сплава ЖС32-ВИ на торец пластины из того же сплава (ионное травление; стрелками указаны направления кристаллографической ориентации в основном металле)

ва ЖС32-ВИ проведены исследования по следующим основным направлениям:

- изучение микроструктуры сварных соединений на узкой подложке с целью обеспечения их технологической прочности при наплавке и последующей термообработке;
- обеспечение формирования наплаваемого металла на торцевой поверхности бандажной полки;
- оценка уровня механических свойств сварных соединений сплава ЖС32-ВИ, полученных при ремонтной микроплазменной порошковой наплавке.

Особенностью микроструктуры однослойной микроплазменной порошковой наплавки сплава ЖС32-ВИ является наличие высокодисперсной дендритной структуры, ориентированный рост ко-

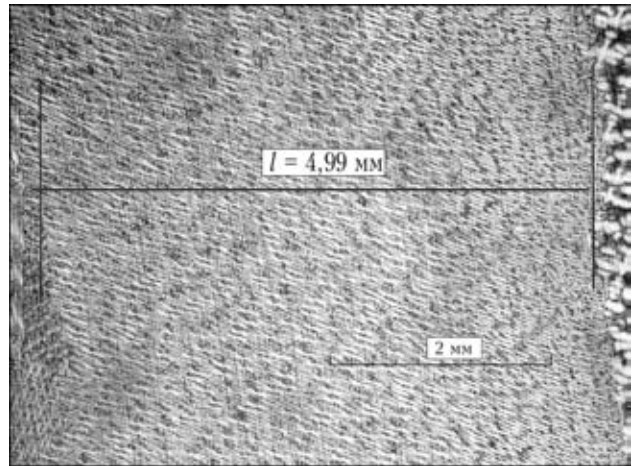


Рис. 2. Микроструктура (X25) однослойной микроплазменной порошковой наплавки сплава ЖС32-ВИ, выполненной на торце пластины (ионное травление;  $l$  — высота слоя ориентированной структуры в наплавленном металле)

торой обусловлен направленным отводом тепла в глубь основного металла (рис. 1). Высота слоя ориентированной структуры может составлять около 5 мм (рис. 2). Преимущественное наследование ориентированной структуры исчезает в приповерхностных слоях при однослойной наплавке (рис. 2), а также во втором слое наплавки (рис. 3).

При отработке технологии наплавки выяснилось, что переход от одно- к двухслойной наплавке значительно увеличивает вероятность образования подваликовых трещин (рис. 4) в процессе послесварочной термической обработки. Поэтому

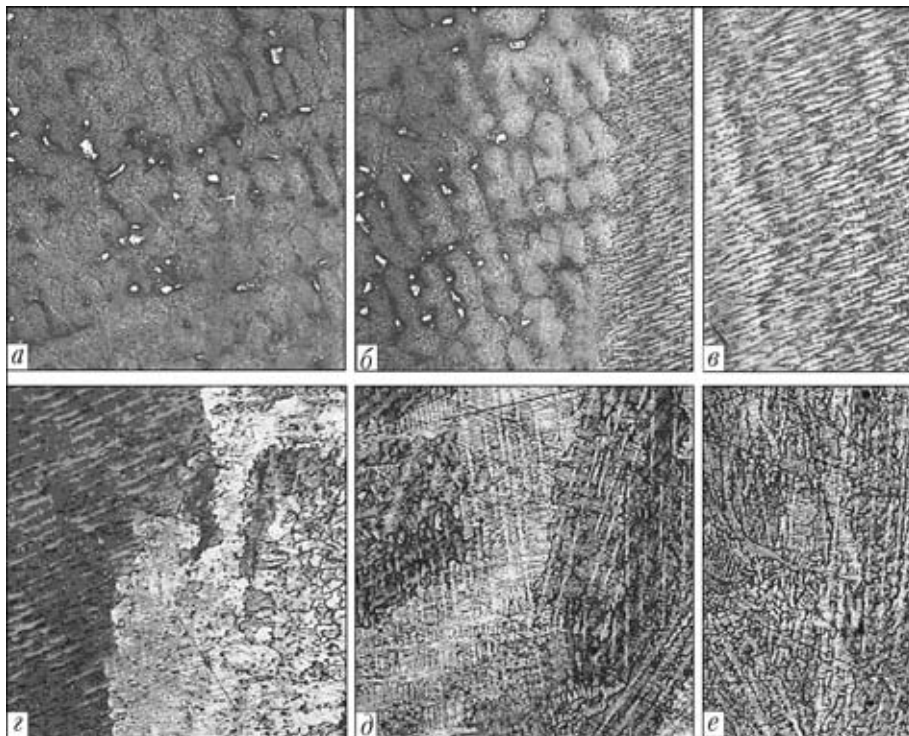


Рис. 3. Микроструктуры (X75) двухслойной наплавки порошка сплава ЖС32-ВИ на торец бандажной полки лопатки сплава ЖС32-ВИ (химическое травление в реактиве Марбле):  $a$  — основной металл;  $b$  — участок сплавления;  $c-e$  — наплавленный металл соответственно первого и второго слоя

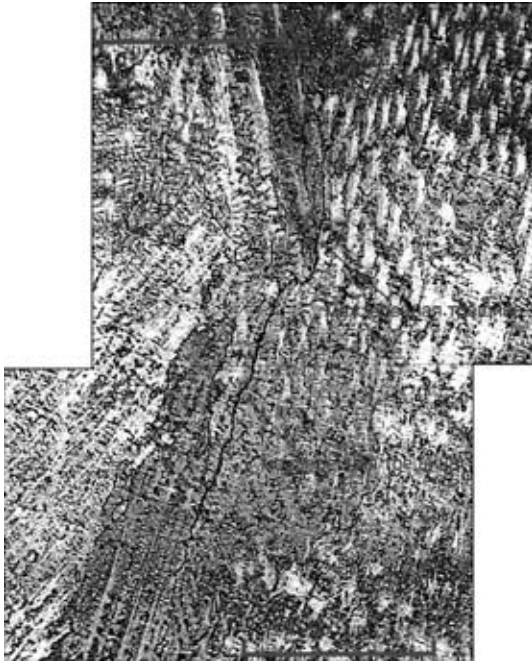


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 113$ ) с межзеренной трещиной в наплавленном металле сплава ЖС32-ВИ в районе линии сплавления между первым и вторым слоем наплавленного металла

для обеспечения приемлемого уровня технологической прочности ремонтных наплавки торцов бандажных полок было принято решение при наплавке ограничиваться одним слоем наплавленного металла (рис. 5).

С точки зрения техники наплавки проточная поверхность бандажных полок рабочей лопатки ТВД (рис. 6) характеризуется сложной формой, разнотолщинностью элементов бандажной полки в пределах 0,50...1,85 мм; наличием трех адиабатических границ начало–конец наплавки. Для обеспечения необходимой высоты наплавки, удержания сварочной ванны на узкой подложке, улучшения формирования наплавленного металла микроплазменную порошковую наплавку выполняли в медном приспособлении в интервале токов 8...20 А с использованием в качестве защитного газа смеси 90 % Ar + 10 %  $H_2$ .

Для оценки длительной прочности образцов, моделирующих реальные условия микроплазменной ремонтной сварки рабочих лопаток ТВД, выполнена наплавка порошком сплава ЖС32-ВИ на узкую подложку шириной 3,5 мм (рис. 7, а). Пластины из сплава ЖС32-ВИ размером 75×40 мм подвергали стандартной термообработке, перед сваркой она была дополнительно термообработана по режиму, имитирующему подготовку лопаток к ремонтной сварке (выдержка в течение 2 ч 30 мин при  $T = (1050 \pm 10) ^\circ C$ ). После наплавки пластину термообработывали по такому же режиму. На каждом этапе отсутствие дефектов (трещин, несплавлений) определяли методом цветовой дефектоскопии. Схема вырезки образца в

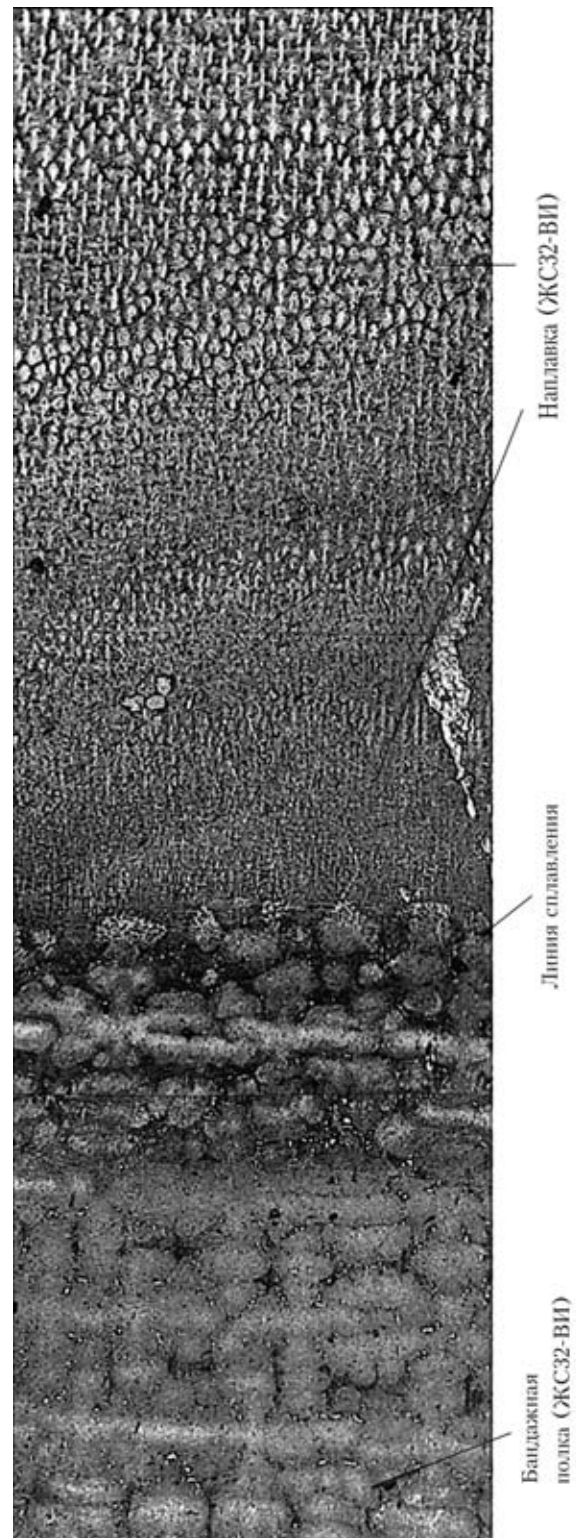


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 75$ ) однослойной наплавки на торец бандажной полки (химическое травление в реактиве Марбле)

виде 50 % основного и 50 % наплавленного металла сплава ЖС32-ВИ приведена на рис. 7, б. Толщина рабочей части образца металла составляла около 3 мм и включала (согласно данным работы [6]) зону фазового превращения  $\gamma + \gamma' \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma + \gamma'$  под действием термического цикла наплавки, которая является одним из наиболее

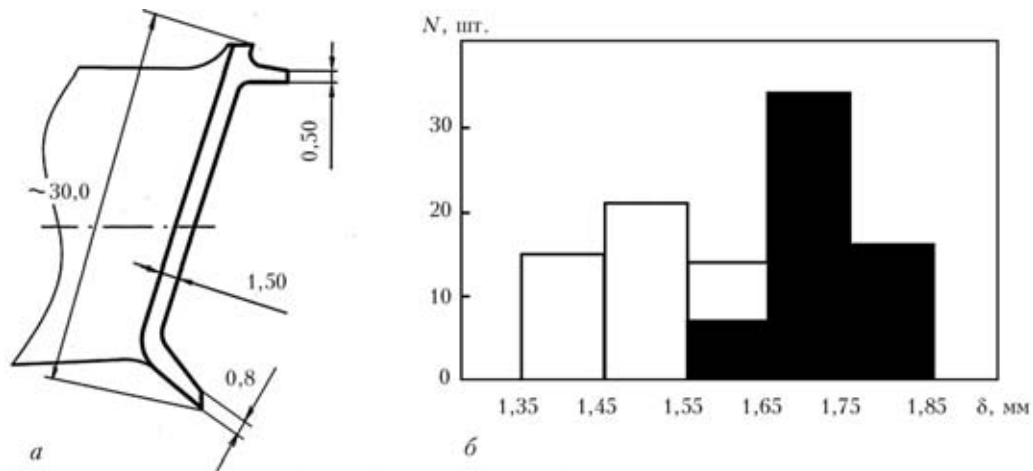


Рис. 6. Геометрические характеристики зоны ремонта (а, б) и внешний вид (в) восстановленной рабочей лопатки ТВД из сплава ЖС32-ВИ: □, ■ — занижение поврежденной поверхности перед наплавкой соответственно на 1,0 и 2,5 мм в партии из  $N = 100$  лопаток;  $\delta$  — ширина торца бандажной полки

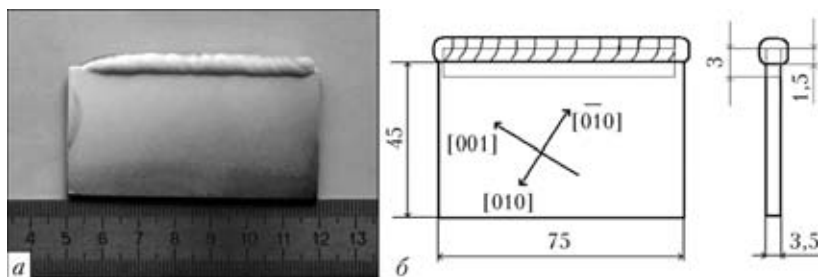


Рис. 7. Внешний вид наплавки порошком сплава ЖС32-ВИ на торец пластины (узкую подложку) (а) и схема вырезки образца, имитирующего условия ремонтной наплавки, для механических испытаний (б) (стрелками указаны направления кристаллографической ориентации в основном металле)

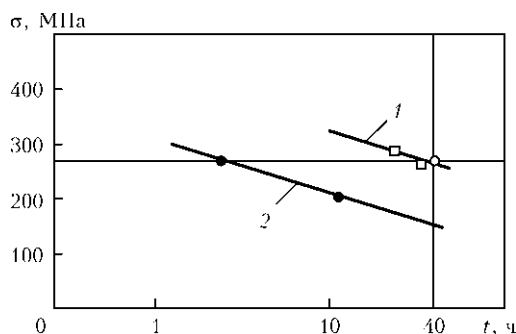


Рис. 8. Длительная прочность  $\sigma$  при  $T = 1000$  °С основного металла (1) и образца (2), имитирующего однослойную наплавку бандажной полки: □, ○ — соответственно экспериментальные и литературные данные

опасных мест разрушения при механических испытаниях жаропрочных никелевых сплавов.

Испытания на длительную прочность при 1000 °С в течение 40 ч образцов, имитирующих условия ремонтной наплавки, выполняли на испытательной машине МП-3Г. Сечение рабочей части образца составляло приблизительно 3,0×3,5 мм. Результаты испытаний приведены на рис. 8. Установлено, что для образца по схеме 50 % основного и 50 % наплавленного металла ЖС32-ВИ, испытанного вдоль линии сплавления при 1000 °С в течение 40 ч составляет 135 МПа, а уровень равнопрочности образца относительно основного металла — 50 %.

В ИЭС им. Е. О. Патона выполнен ремонт микроплазменной порошковой наплавкой опыт-

но-промышленной партии рабочих лопаток ТВД из сплава ЖС32-ВИ в количестве 512 шт. (4 комплекта для двигателя Д18Т). Восстановленные микроплазменной порошковой наплавкой лопатки передали на ЗМКБ «Прогресс» для механической обработки и капиллярного контроля ЛЮМ1-ОВ. Согласно статистическим исследованиям ЗМКБ «Прогресс», проведенным по данным капиллярного контроля ЛЮМ1-ОВ, общий процент брака при восстановлении торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД микроплазменной порошковой наплавкой порошком ЖС32-ВИ не превышал 3...5 %.

Разработанная ИЭС им. Е.О. Патона технология ремонтной микроплазменной порошковой наплавки рабочих лопаток из сплава ЖС32-ВИ двигателя Д18Т и 2 комплекта специализирован-

ного оборудования внедрены в производство на ЗМКБ «Прогресс» (г. Запорожье).

1. Пейчев Г. И., Замковой В. Е., Ахрамеев Н. В. ЗМКБ «Прогресс»: новые материалы и прогрессивные технологии в авиадвигателестроении // Технолог. системы. — 2000. — № 2. — С. 5–15.
2. Новости от 14 нояб. 2006 // www. avia.ru.
3. Перемилоский И. А., Петрик И. А. Упрочнение бандажных полок лопаток турбины жаропрочными сплавами // Газотурбин. технологии. — 2002. — № 3. — С. 90–92.
4. Разработка и внедрение высокотемпературного износостойкого сплава для упрочнения бандажных полок лопаток ГТД / Г. И. Пейчев, А. К. Шулин, В. Е. Замковой и др. // Технолог. системы. — 2000. — № 3. — С. 40–42.
5. Мелехов Р. К., Похмурский В. І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. Властивості, деградація. — К.: Наук. думка, 2003. — 384 с.
6. Характер образования горячих трещин при сварке литых жаропрочных никелевых сплавов / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Н. О. Червяков, А. В. Звягинцева // Автомат. сварка. — 2004. — № 8. — С. 35–40.

Described is the technology developed by the E. O. Paton Electric Welding Institute for repair microplasma powder cladding of flange platform faces of high-pressure turbine blades made from alloy JS32-VI for engine D18T by using an additive powder with a composition similar to that of the base metal. It is shown that the one-layer deposited metal preserves preferred inheritance of structure of the base metal. It was established that the samples simulating the repair cladding conditions, tested to long-time strength at a temperature of 1000 °C, have a strength level of about 50 % of strength of the base metal along the fusion line.

Поступила в редакцию 18.04.2010

## ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

объявляет ежегодный набор в

### ДОКТОРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

### АСПИРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием в аспирантуру проводится в сентябре.

Контактный телефон: 289-84-11

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): [www.paton.kiev.ua](http://www.paton.kiev.ua)

Документы направлять по адресу:

03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю