

# ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ ПРИ РЕМОНТЕ ЛОПАТОК ТУРБИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**П.Д. ЖЕМАНЮК, И.А. ПЕТРИК, С.Л. ЧИГИЛЕЙЧИК**

АО «МОТОР СИЧ». 69068, г. Запорожье, пр-т Моторостроителей, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

Рассмотрены особенности технологии серийного ремонта рабочих лопаток турбин высокого давления авиационных двигателей, применяемой на АО «МОТОР СИЧ», оборудование, техника и технология микроплазменной наплавки, наплавочные материалы, термическая обработка. Представлены основные типы восстановленных деталей и приведен пример микроструктуры металла зоны ремонта. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 7.

*Ключевые слова:* никелевые жаропрочные сплавы, ресурс, термоусталостные трещины, микроплазменная порошковая наплавка, технология

С 70-х годов прошлого века ремонт рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) на АО «МОТОР СИЧ» (восстановление изношенных торцов и боковых стенок бандажных полок), осуществлялся способом аргодуговой наплавки [1]. Следует отметить, что наше предприятие было в СССР пионером в ремонтной наплавке авиационных лопаток из никелевых жаропрочных сплавов, которые на то время считались абсолютно несвариваемыми. Эта технология долгое время позволяла серийно ремонтировать такие детали ряда газотурбинных двигателей [2].

В связи с ростом рабочей температуры и ресурса эксплуатации у авиационных двигателей, появившихся относительно недавно (Д18Т, Д436, АИ222, АИ-450), лопатки ТВД для эксплуатации при температуре более 1000 °С стали изготавливаться из более легированных никелевых жаропрочных сплавов, таких как ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ [3–5]. При наработке более 6 тыс. ч, кроме эксплуатационного износа торцов и боковых стенок бандажных полок, на поступающих в ремонт лопатках наблюдаются термоусталостные трещины глубиной до 6 мм. Технология аргодуговой наплавки и существующие для данного процесса наплавочные материалы не обеспечивают необходимых для эксплуатации лопаток жаропрочных свойств восстановленной поверхности. Увеличенный износ, а значит и масса наплавленного металла, повысили склонность к образованию горячих трещин при восстановлении аргодуговым процессом данных лопаток из современных сложно легированных никелевых жаропрочных сплавов (с содержанием  $\gamma'$ -фазы более 60 %).

Целью данной работы является описание особенностей разработки технологии наплавки, позволяющей повысить ремонтпригодность и продлить ресурс рабочих лопаток ТВД (с наработкой более 6 тыс. часов) из жаропрочных никелевых сплавов ЖС32-ВИ и ЖС26-ВИ.

Основные задачи, которые ставились ремонтным производством к такой технологии:

- восстановление поврежденных участков лопаток после эксплуатации (бандажных полок, лабиринтных гребешков, Z-образных профилей и торцов пера) на жаропрочных сплавах ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС6К-ВИ и ЖС6У-ВИ с использованием равнопрочного основному металлу присадочного материала;

- совершенствование технологии наплавки за счет применения источника сжатой дуги с прецизионной регулировкой сварочного тока и механизацией подачи присадочного материала, что давало бы возможность наплавки с ограниченной глубиной проплавления и, соответственно, перемешиванием наплавленного металла с основным.

На тот момент опыт успешного решения данной задачи имелся у ИЭС им. Е.О. Патона и ГП «Ивченко Прогресс». Было создано специальное оборудование и внедрена в производство технология микроплазменной порошковой наплавки (МПН) для восстановления рабочих лопаток ТВД из сплава ЖС32-ВИ двигателя Д18Т [6]. Принципиальная схема микроплазменной порошковой наплавки представлена на рис. 1. Наплавляемый материал в виде порошка вносится транспортирующим газом в столб микроплазменной дуги, формируемой в среде аргона посредством канала плазмообразующего сопла. Нагреваясь в столбе дуги, порошок переносится в сварочную ван-

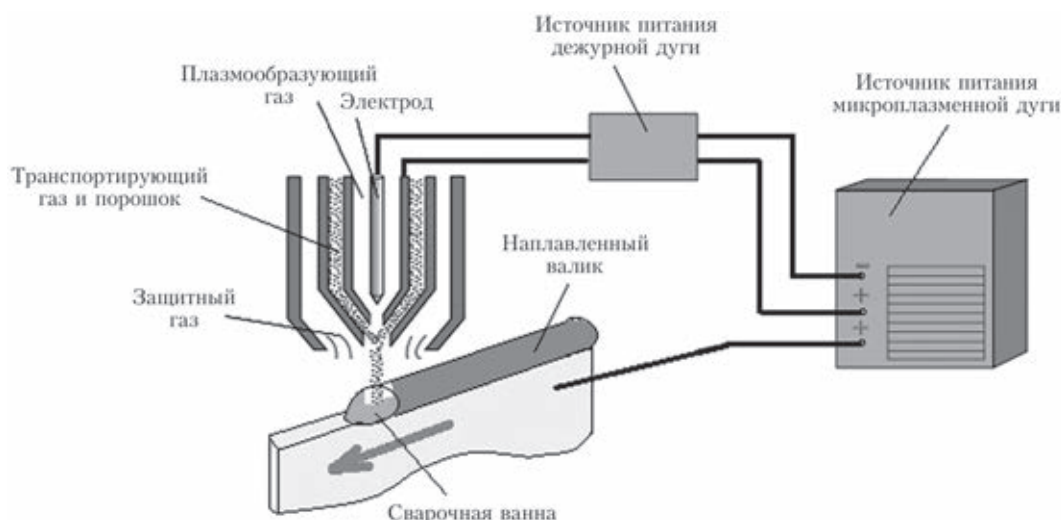


Рис. 1. Схема процесса МПН

ну, образующуюся под воздействием теплового потока микроплазменной дуги на изделии (в нашем случае – на кромке лопатки). Однако у этого процесса на тот момент присутствовал целый ряд технологических недостатков, препятствующих серийному применению МПН на АО «МОТОР СИЧ»:

- широкий наплавочный валик (более 5 мм), что значительно повышало трудоемкость механической обработки после наплавки и опасность возникновения шлифовочных трещин;
- недостаточная точность регулирования режимов наплавки в процессе восстановления лопаток, особенно на токах до 15 А;
- ограниченность применения — наплавка только одного слоя; при наплавке двух и более слоев проявлялась повышенная склонность к образованию трещин как в процессе наплавки, так и последующей термической обработки;
- большие габариты оборудования, особенно плазмотрона, что ухудшало условия работы.

С учетом имеющегося в ИЭС им. Е.О. Патона и ГП «Ивченко Прогресс» опыта, как положительного, так и отрицательного, специалистами нашего предприятия было разработано техническое задание и на его основе немецкой компанией «Делоро Стеллит» (на данный момент «Кеннеметалл Стеллит») была разработана и изготовлена специ-

ализированная установка STARWELD 190Н для МПН [7], в состав которой входили:

- плазмотрон НРН 80;
- источник питания дежурной дуги INV 50;
- источник питания основной дуги INV 190;
- блок подачи газа GT-R5-20 (транспортирующего и защитного газа);
- блок подачи плазмообразующего газа GT-S 5;
- блок водяного охлаждения LT-01;
- питатель для подачи порошка PR-S2;
- блок управления SIEMENS Simatic S 7-300.

Был проведен ряд опытных и исследовательских работ, результатом которых стало создание комплексной технологии ремонта рабочих лопаток ТВД из никелевых жаропрочных сплавов ЖС32-ВИ и ЖС26-ВИ со следующей последовательностью технологических операций.

1. Механическая зачистка до металлического блеска (удаление нагара, окислов и теплозащитных покрытий) поверхности от наплавляемого торца или гребешка на глубину 5...10 мм.
2. Вакуумный обезгаживающий отжиг ( $T = 1250 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , время выдержки 20...30 мин, среда — вакуум ( $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ ) мБар).
3. Капиллярный контроль ЛЮМ1-ОВ. При обнаружении трещин — полное удаление механическим способом.
4. Наплавка торца пера лопатки (см. рис. 1) способом микроплазменной порошковой наплавки порошком из сплава ЖС32-ВИ (фракция +63...-163 мкм) в 1...5 слоев на установке STARWELD 190Н.
5. Вакуумный отжиг ( $T = 960 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , время выдержки 180...240 мин, среда — вакуум ( $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ ) мБар).
6. Механическая обработка наплавленных поверхностей до необходимых геометрических размеров.
7. Капиллярный контроль ЛЮМ1-ОВ.

**Характеристика основных технологических параметров микроплазменной порошковой наплавки**

Параметр режима	Диапазон значений
Сварочный ток (для плазмотрона НРН 80)	3,0...30 А
Напряжение	20...25 В
Расход плазмообразующего газа	0,5...2,0 л/мин
Расход защитного газа	5...15 л/мин
Диаметр канала плазменного сопла	1,6...3,2 мм
Диаметр вольфрамового электрода	2,4 мм
Производительность подачи порошка	0,5...5,0 г/мин

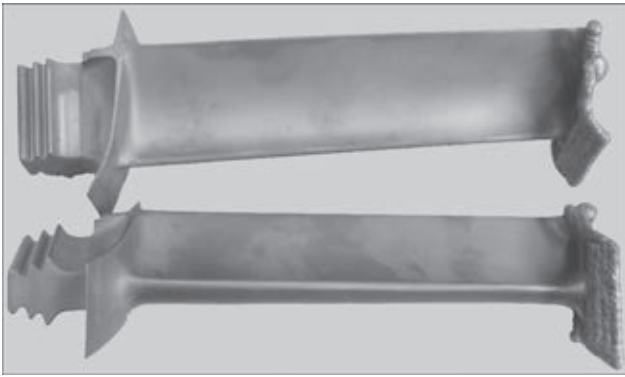


Рис. 2. Лопатки после восстановления бандажной полки (основной металл — сплав ЖС26-ВИ, материал наплавки — сплав ЖС32)

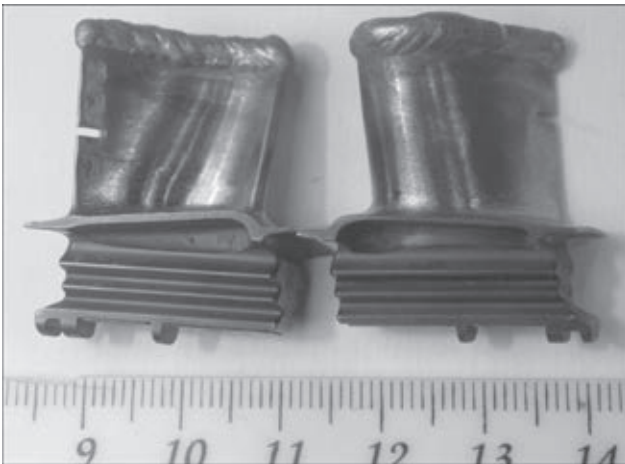


Рис. 3. Лопатки после восстановления торца пера (основной и наплавленный металл — сплав ЖС32)



Рис. 4. Лопатка после восстановления Z-образного профиля (основной и наплавленный металл — сплав ЖС6К)

- 8. Восстановление покрытий.
- 9. Капиллярный контроль ЛЮМ1-ОВ.

Основные параметры режима МПН, используемые при восстановлении рабочих лопаток ТВД, приведены в табл. 1.

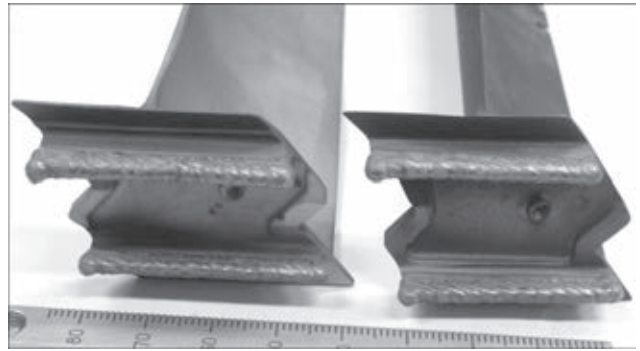


Рис. 5. Лопатки после восстановления лабиринтных гребешков (основной металл — сплав ЖС6К, материал наплавки — сплав Stellite 12)

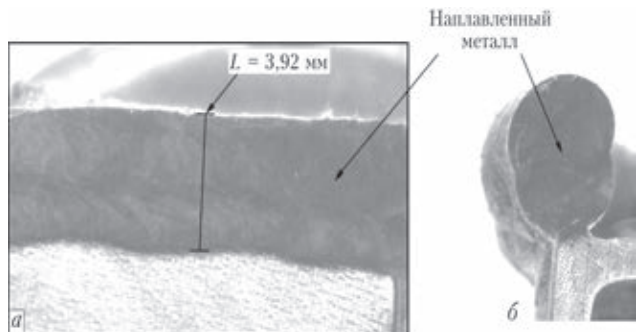


Рис. 6. Внешний вид продольного (а) и поперечного (б) сечения восстановленного уплотнительного элемента лопатки

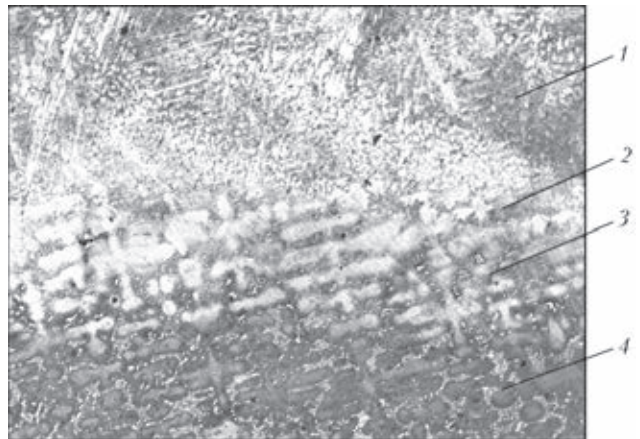


Рис. 7. Микроструктура ( $\times 100$ ) восстановленного уплотнительного элемента: наплавленный металл ЖС32 (1), линия сплавления (2), ЗТВ (3) и основной металл ЖС32-ВИ (4)

Эффективное тепловложение в основной металл в пределах 50...650 Вт регулируется энергетическими и тепловыми характеристиками микроплазменной дуги. Для данного процесса используются порошки никелевых и кобальтовых сплавов с фракцией +63...-160 мкм, полученные методом сухого распыления слитка в атмосфере аргона. Основные используемые порошки из сплавов ЖС32-ВИ, ЖС6К-ВИ, ВЗК, Stellite 12 и Nistelle С. Внешний вид серийно восстанавливаемых лопаток способом МПН представлен на рис. 2-5.

Пример металлографического контроля восстановленной лопатки из сплава ЖС32-ВИ приведен на рис. 6, 7. Анализ продольных и поперечных



шлифов показал, что при 2-х слойной наплавке торца пера порошком из сплава ЖС32-ВИ высота наплавленного слоя составила около 4 мм, толщина — 3,0...3,5 мм (см. рис. 6). Зона термического влияния незначительная, структурные изменения составили около 0,1...0,2 мм (см. рис. 7). Недопустимые дефекты металлургического характера в наплавленном металле и зоне термического влияния (ЗТВ) не выявлены.

### Выводы

Внедрение МПН на АО «МОТОР СИЧ» позволило повысить ремонтпригодность значительной части рабочих лопаток ТВД с наработкой более 6 тыс. ч. Это стало возможным за счет освоения технологии восстановления основного металла (наплавка в несколько слоев) при значительных повреждениях после эксплуатации бандажных полок, лабиринтных гребешков, Z-образных профилей и торцов пера на жаропрочных сплавах ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС6К-ВИ и ЖС6У-ВИ с преимущественным использованием равнопрочного основного металлу присадочного материала.

Технология МПН кромок лопаток усовершенствована за счет применения сфокусированной

микроплазменной дуги, прецизионной регулировки сварочного тока, механизации подачи дисперсного присадочного материала и рационального выбора режимов предварительной и последующей термической обработки.

1. *Перемилловский И.А., Гейченко В.С., Фрумлин И.И.* Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей // Автомат. сварка. – 1976. – № 5. – С. 54–56.
2. *Петрик И.А., Перемилловский И.А.* Дальнейшее развитие технологии упрочнения бандажных полок лопаток турбины из жаропрочных сплавов // Технологические системы. – 2001. – № 3. – С. 90–92.
3. *Братухин А.Г.* Современные авиационные материалы: технологические и функциональные особенности. – М.: Авиатехинформ, 2003. – 438 с.
4. *Каблов Е.Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСиС, 2001. – 632 с.
5. *Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II / В.А. Богуслаев, В.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк, В.И. Колесников.* – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с.
6. *Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К.А. Ющенко, В.С. Савченко, А.В. Яровицын и др.* // Автомат. сварка. – 2010. – № 8. – С. 25–29.
7. *Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье // Там. же.* – 2010. – № 1. – С. 59–62.

Поступила в редакцию 08.06.2015

## MEDOVAR MEMORIAL SYMPOSIUM

### Международный симпозиум к 100-летию со дня рождения Б.И. Медовара

7–10 июня 2016 г., Киев, Украина

#### ТЕМАТИКА СИМПОЗИУМА

- ЭШП и другие процессы специальной электрометаллургии, их научные основы, технологии и оборудование;
- электрошлаковое литье;
- сварка высоколегированных и высокопрочных сталей, а также аустенитных сталей и сплавов;
- теория кристаллизации сталей и сплавов;
- управление затвердеванием в металлургии и сварке;
- крупные кузнечные и листовые слитки;
- моделирование затвердевания в процессах специальной электрометаллургии и сварки;
- современные стали для магистральных газопроводов, сосудов давления, крупных поковок, роторов, валков;
- родственные области металлургии, сварки и металловедения.

#### Организационный комитет

Тел.: +38(044) 287-52-18, +38(044) 337-30-81

Тел./факс: +38(044) 337-30-82

E-mail: [org@medovar100.org](mailto:org@medovar100.org), [info@medovar100.org](mailto:info@medovar100.org)

Дополнительная информация на сайте симпозиума [www.medovar100.org](http://www.medovar100.org)