

УДК 621.793.6:669.245

В.П. ЛЕСНИКОВ¹, В.П. КУЗНЕЦОВ², А.В. КОРОТКИХ¹

¹*ООО «Турбомет», Екатеринбург, Россия*

²*Уральский государственный технический университет «УПИ», Екатеринбург, Россия*

ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК ГТД

В работе представлена технология восстановительного ремонта рабочих и сопловых лопаток после выработки ресурса на авиационном двигателе, которая включает в себя: анализ повреждаемости лопаток, удаление дефектного слоя с поверхности лопаток, восстановление защитного покрытия, восстановление структуры и свойств материала-основы. Данная технология позволяет восстанавливать рабочие и сопловые лопатки для использования в наземных ГТУ с требуемым межремонтным интервалом.

повреждаемость, дефектный слой, бифторид калия, газовое циркуляционное алитирование, газостатическое прессование (ГИП), термообработка

Введение

Наземные газотурбинные электростанции и газоперекачивающие станции при своих незначительных размерах обладают большой мощностью (до 25 МВт) и высоким КПД, а также чрезвычайно мобильны и универсальны, вследствие этого востребованы рынком. Стоимость таких установок, сроки их изготовления, минимальные затраты в обслуживании и простота эксплуатации зачастую являются основополагающими признаками конкурентоспособности. Поэтому, актуальными на сегодняшний день являются газотурбинные установки с приводом, укомплектованным рабочими и сопловыми лопатками, отработавшими установленный ресурс на авиационном двигателе и прошедшими восстановительный ремонт. Такие лопатки гарантировано отработают необходимый ресурс (~50 000 часов), так как в наземной турбине более низкие обороты и температура газов на входе снижена на несколько сотен градусов.

1. Анализ эксплуатационной повреждаемости

Настоящее исследование проводилось на рабочих лопатках 1 ступени с наработкой 1099 часов и

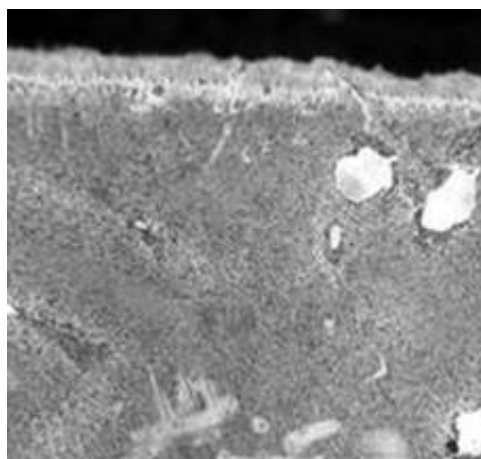
сопловой лопатке 1 ступени с наработкой 828 часов из сплава ЖС6У тяжело нагруженного авиационного газотурбинного двигателя.

На основе металлографического, электронно-микроскопического исследования микроструктуры сплава и защитных покрытий, а также микрорентгеноспектрального анализа химического состава сделан вывод, что на поверхности лопаток имеется дефектный слой, в структуре наблюдается развитие эксплуатационной микропористости, имеется нарушение структуры сплава-основы. На основе анализа эксплуатационной повреждаемости, проведенного на данных лопатках, разработана комплексная технология ремонта, включающая в себя: удаление дефектного слоя с наружной и внутренней поверхности лопаток, проведение восстановления структуры сплава и устранение внутренней микропористости; нанесение газоциркуляционного покрытия (ГА) на наружную и внутреннюю поверхность лопатки; нанесение ионно-плазменного покрытия (ВСДП-11, СДП-1) на наружную поверхность.

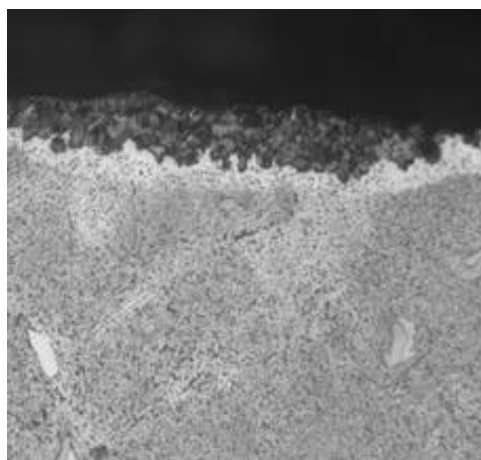
2. Удаление дефектного слоя

Для получения защитного покрытия, которое обеспечит заявленный ресурс работы лопаток на энергетических установках, необходимо до нанесе-

ния «нового» покрытия удалить дефектный слой с наружной и внутренней поверхности лопаток. Дефектный слой снаружи состоит из остатков защитного покрытия и продуктов окисления покрытия, а внутри – из продуктов окисления сплава. Дефектный слой с лопаток удалялся с помощью травления их в расплаве бифторида калия (KNF_2) при $T = 350 - 370 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 10$ минут (рис. 1).



а)



б)

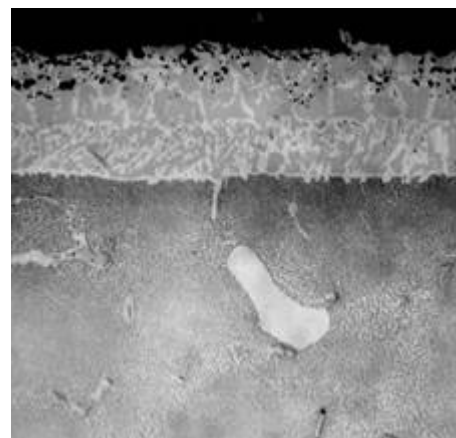
Рис. 1. Микроструктура пера рабочей лопатки после эксплуатации и травления в БФК, $\times 500$:
а) наружная поверхность;
б) внутренняя полость

Установлено, что обработка в бифторида калия (БФК) удаляет оксиды Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 в зоне высокотемпературного окисления. В зоне низкотемпературного окисления обработка малоэффективна. С наружной и внутренней поверхности сопловых лопаток дефектный слой, при выдержке в

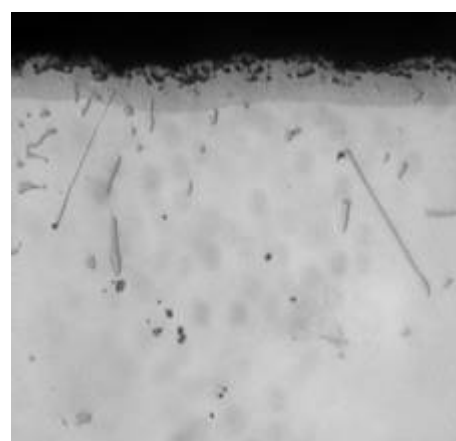
течение 10 минут в расплаве БФК, удаляется до такой степени, при которой можно успешно нанести «новое» защитное покрытие циркуляционным газовым методом по стандартной технологии.

3. Восстановление защитного покрытия

Нанесение алюминидного покрытия ГЦП ГА на лопатки после травления в БФК осуществлялось на установке ШГА циркуляционным газовым методом по серийной технологии ООО «ТУРБОМЕТ» ($T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 6$ часов). Микроструктура «нового» алюминидного покрытия на наружной и внутренней поверхности рабочей лопатки приведена на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Микроструктура пера рабочей лопатки после травления в БФК и нанесения «нового» защитного покрытия, $\times 500$:
а) наружная поверхность;
б) внутренняя полость

ГЦП ГА надежно наносится на поверхности воздухо-охлаждаемых каналов и наружную поверхность рабочих и сопловых лопаток, прошедших очистку в БФК, и может быть использовано в качестве технологического покрытия перед ГИП обработкой.

4. Устранение внутренней микропористости

При анализе микроструктуры лопаток неоднократно наблюдалась литейная и эксплуатационная микропористость (рис. 3), что отрицательно сказывается на надежности и работоспособности лопаток, так как она является источником зарождения микротрещин.

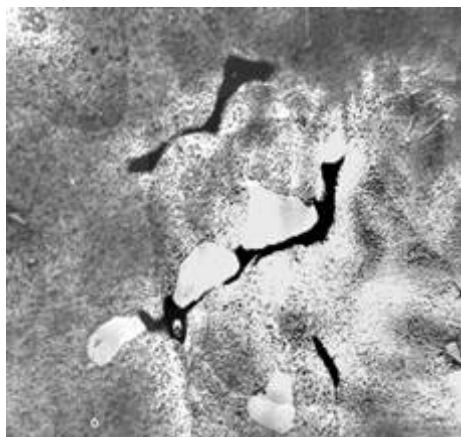


Рис. 3. Вид внутренней микропористости, $\times 500$

Наиболее перспективным методом устранения микропористости является газо-изостатическое прессование (ГИП) при повышенных температурах. ГИП проводили по следующему режиму: $T = 1230\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1800\text{ атм.}$, $\tau = 3\text{ часа}$. Данный режим проведения ГИП обеспечил устранение микропористости и восстановление структуры сплава ЖС6У рабочих лопаток после эксплуатации.

Проведенные исследования свидетельствуют о существенном влиянии ГИП на температурные интервалы фазового превращения сплава ЖС6У, т.е. ГИП повышает температуру растворения γ' -фазы, уменьшает стабильность карбидов, залечивает поры.

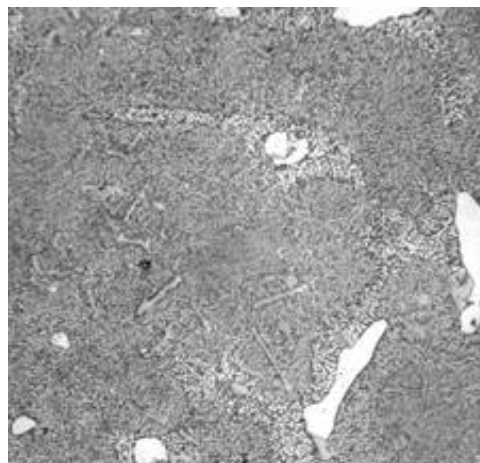


Рис. 4. Структура сплава после ГИП, $\times 500$

Нанесенное покрытие ГЦП ГА до ГИП предотвратило окисление сплава на замке лопатки.

5. Восстановительная термообработка

Восстановление структуры и свойств сплава основы после ГИП проводилось с помощью двух различных режимов термообработки:

- состояние 1 – отжиг при $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4\text{ часа}$;
- состояние 2 – термовакуумная обработка $T = 1220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2,5\text{ часа}$.

Дальнейшее исследование структуры сплава проводилось методом трансмиссионной электронной микроскопии. Заготовки вырезались из «спинки» выходной кромки лопатки с соблюдением мер, исключающих нагрев и сквозной наклеп образца.

В состоянии 1 для субструктуры сплава характерны:

- нерегулярность размеров и форм частиц первичной γ' -фазы. Размеры γ' -частиц колеблются в пределах $\sim 0,5 - 2\text{ мкм}$, а форма – от кубоидной до произвольно округлой;
- присутствие в структуре значительного количества аустенита, претерпевшего дисперсный распад ($\gamma + \gamma''$);
- дисперсные бориды M_5B_3 ($\leq 50\text{ нм}$), регулярно обнаруживаемые вдоль γ/γ' границ;

- наличие скоплений достаточно крупных частиц боридов M_5B_3 , которые могут выстраиваться в ряды;
- наличие вдоль границ зерен карбидов типа M_6C ;
- наличие достаточно крупных, протяженных карбидов типа MC в теле зерен;
- наличие дислокационных скоплений, сеток в γ -фазе и вдоль границ γ/γ' -фаз.

В состоянии 2 для структуры сплава типичны:

- однородная, достаточно дисперсная $\gamma + \gamma'$ структура с четкой плоской огранкой γ' -частиц по $\{100\}_\gamma$ с размерами кубоидов $\sim 0,3 \div 0,5$ мкм;
- волнистые, зубчатые межзеренные границы, в основном свободные от каких-либо выделений, но в некоторых местах на границах присутствуют выделения карбидов;
- наличие внутри зерен первичных карбидов типа MC , имеющих иногда ровные, а иногда волнистые границы.

После ГИП и диффузионного отжига был проведен микрорентгено-спектральный анализ алюминидного покрытия на пера рабочих лопаток, который показал, что данное покрытие снаружи имеет 14 – 18 масс.% Al, во внутренних полостях ~ 18 масс.% Al (до ГИП толщина покрытия в районе корыта составляла: снаружи ~ 40 мкм, во внутреннем канале ~ 30 мкм). Покрытие является многофазным и пластичным (микротвердость алитированного слоя на пера рабочей лопатки при нагрузке 50 г составила: на наружной зоне – 466 – 487 кгс/мм², в диффузионной зоне – 585 – 615 кгс/мм², в основе сплава – 412 – 429 кгс/мм²).

На внешней поверхности пера лопатки после ГИП и диффузионного отжига формируется легированное покрытие, которое может самостоятельно выступать в качестве защитного покрытия для использования лопаток в составе наземных ГТУ. При необходимости защитное покрытие можно усилить

нанесением ВСДП-11, СДП-1 по отработанной технологии на установке МАП-1.

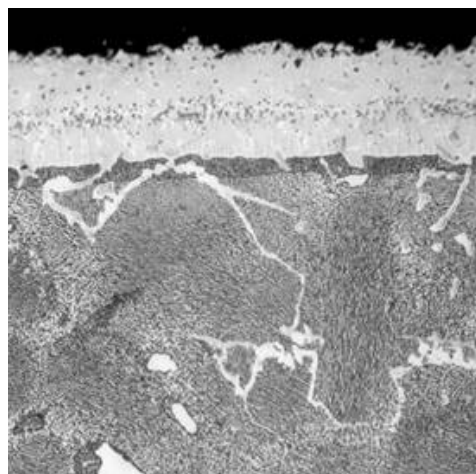


Рис. 5. Микроструктура алюминидного покрытия на наружной поверхности рабочей лопатки после проведения ГА + ГИП + отжиг ($T = 1050$ °С, $\tau = 4$ ч), $\times 500$

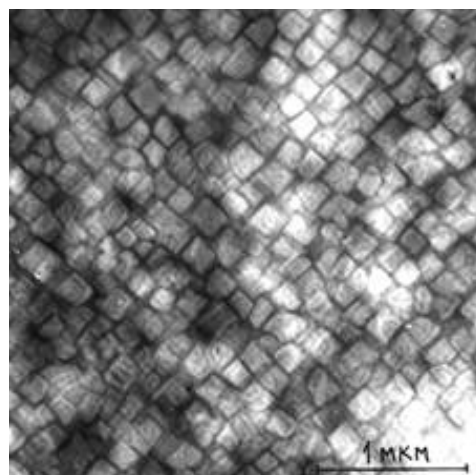


Рис. 6. Тонкая структура сплава-основы после восстановительной термообработки, $\times 26000$

Заключение

Рабочие и сопловые лопатки после проведенного восстановительного ремонта прошли стандартные испытания и показали увеличение уровня механических свойств, в частности рост по усталости и по термоциклике.

Поступила в редакцию 20.04.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.А. Филиппов, Уральский государственный технический университет «УПИ», Екатеринбург.