

ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

УДК 62-226.2.004.67:621.165

А. М. Смыслов, д-р техн. наук проф.; М. К. Смылова;

А. Н. Исанбердин; С. С. Людвиницкий

(Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа)

Новая технология восстановления рабочих лопаток паровых турбин

Одними из наиболее ответственных деталей паровых турбин (ПТ), от состояния которых во многом зависит экономичность и безаварийная эксплуатация турбины, являются рабочие лопатки (РЛ) цилиндра низкого давления (ЦНД). В процессе эксплуатации РЛ последних и предпоследних ступеней ЦНД подвергаются капельной эрозии — изнашиванию вследствие соударения их входных кромок с каплями влажного пара [1—3]. Применяемые на сегодняшний день способы защиты РЛ от капельной эрозии несколько увеличивают их долговечность, однако не решают проблему в целом. Эрозионный износ остается главной причиной, ограничивающей ресурс рабочих лопаток ЦНД. Интенсивность износа зависит от типа турбины, ее мощности, условий эксплуатации, материала РЛ, применяемых способов защиты. После нескольких лет эксплуатации область эрозии на входных кромках достигает в ширину до 5...30 мм, на длине 120...450 мм от периферийного конца РЛ (рис. 1).

Эрозионный износ снижает вибрационную надежность и прочность лопаток. Эрозионные повреждения становятся концентраторами напряжений, в результате чего многократно возрастает риск усталостного разрушения РЛ [4, 5]. В результате изменения геометрии РЛ из-за эрозионного износа КПД последней ступени ЦНД паровых турбин уже после 10...20 тыс. ч работы может снижаться на 3...10% [6]. Экономические потери возрастают с течением времени. Из-за снижения экономичности турбины и повышения риска обрыва РЛ их замена новыми целесообразна уже через 4,5...5 лет эксплуатации [7].

Рабочие лопатки ЦНД — дорогостоящие детали, поэтому с 70-х годов прошлого столетия в нашей стране и за

рубежом ведется разработка способов их восстановления [8, 9]. Ремонт является экономически целесообразным, стоимость восстановления изношенных РЛ не превышает 30...40% от стоимости новых. Таким образом, восстановление только одной ступени паровой турбины типа ПТ-60 позволяет сэкономить 2...3 млн руб. Наиболее широко внедрены технологии, разработанные ОАО "НПО Центральный котлотурбинный институт" (Санкт-Петербург) [10], ОАО "Всероссийский теплотехнический институт" (Москва) [11] и ОАО "Теплоэнергосервис" (Екатеринбург) [12].

Процесс восстановления РЛ с изношенной входной кромкой включает следующие основные операции: механическое удаление поврежденного участка; наплавку кромки либо приварку вставки; механическую обработку кромки для придания перу необходимого профиля; приварку защитных накладок на входную кромку.

Известные технологии различаются условиями проведения ремонта — в демонтированном состоянии или на роторе, вариантами термической обработки, выбором присадочных материалов, способами и режимами сварки и наплавки и пр. Некоторые из них применяются в течение многих лет, однако при этом имеют некоторые недостатки, снижающие надежность отремонтированных лопаток и усложняющие проведение ремонта.

В 2002 году ООО "НПП Уралавиаиспехтехнология" совместно с Уфимским государственным авиационным техническим университетом, ДООО "Энергоремонт", ОАО "Башкирэнерго" (Уфа) и ОАО "Ленинградский металлургический завод" (Санкт-Петербург) разработали технологию ремонта РЛ паровых турбин из сталей 20X13 и 15X11МФ наплавкой. В проведенных НИОКР было исследовано влияние различных технологических воздействий на структурно-фазовое состояние и механические свойства материала лопаток.

В качестве способа восстановления выбрана многослойная наплавка, так как этот метод более технологичен, проще с точки зрения внедрения технологии, чем способ приварки вставки. Для защиты РЛ от изнашивания после восстановления исследовали как традиционный способ — приварку защитных накладок из стеллита, так и перспективные методы нанесения покрытий.

При разработке технологии было уделено особое внимание нескольким направлениям повышения технологичности процесса и качества восстановленных изделий:

- выбор присадочных материалов, режимов наплавки/сварки;

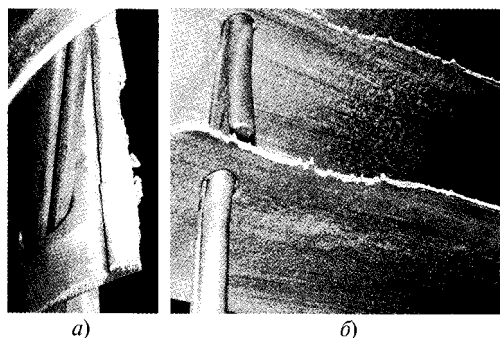


Рис. 1. Изношенные рабочие лопатки ЦНД турбины ПТ-60-130/13:
а — Ново-Стерлитамакской ТЭЦ, наработка 44 000 ч, вид со стороны спинки;
б — Приуфимской ТЭЦ, наработка 185 000 ч, вид со стороны корыта

- применение в качестве термической обработки самоотпуска;
- применение импульсного режима наплавки/сварки;
- нанесение защитных покрытий.

При сварке хромистых сталей в качестве присадочного материала применяют либо материал близкий по химическому составу к основному металлу, либо материалы аустенитного или аустенитно-ферритного класса. Нами для наплавки кромок и приварки защитных накладок была выбрана присадочная проволока на никелевой основе ЭП-367 (Св-06Х15Н60М15). Ее особенности — высокая пластичность и низкая температура плавления. Это позволяет избежать "подплавления" границ зерен в околошовной зоне и обеспечивает "залечивание" возникающих в процессе сварки микродефектов [13].

При сплавлении присадочного материала на никелевой основе со сталью существует опасность образования неоднородного материала с нестабильными структурными составляющими в зоне сплавления. Для устранения этого явления применили режимы наплавки, обеспечивающие крайне малый размер зоны термического влияния и зоны сплавления, прежде всего за счет низкой погонной энергии.

Существуют два подхода к ремонту РЛ паровых турбин: ремонту подвергают лопатки, снятые с турбины; ремонт производят без демонтажа лопаток, непосредственно на роторе. Во втором случае процесс восстановления значительно технологичнее, быстрее и дешевле, благодаря отсутствию достаточно сложных операций по демонтажу и монтажу лопаток [14], но он исключает возможность проведения печной термической обработки.

Авторами исследована возможность применения самоотпуска при восстановлении РЛ паровых турбин наплавкой. Применение послесварочного самоотпуска может оказывать влияние, аналогичное традиционной термической обработке — снижение остаточных напряжений, стабилизацию структуры без существенных затрат. Для самоотпуска на изделие после сварки (после каждого прохода) накладывают теплоизолирующий кожух, замедляющий остывание нагретого металла. При выдерживании изделия при высокой температуре за счет тепла, введенного в него в процессе сварки, происходит его отпуск.

Эффективным способом улучшения структурно-фазового состояния материала в зоне сварки является применение импульсного режима сварки. При этом достигается измельчение зерна как в литом металле сварного шва, так и в зоне термического влияния. Авторами экспериментально определена эффективность применения импульсного режима для наплавки РЛ из хромистых сталей.

В качестве основного метода защиты стальных РЛ используют приварку или припайку защитных накладок из стеллита. Были исследованы возможности перспективных методов нанесения покрытий. В частности, опробованную для новых лопаток из титановых сплавов и стали 20Х13 технологию комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки [15, 16]. Ее суть в проведении последовательно в одном технологическом цикле операций модифицирования поверхности путем ионной имплантации и нанесения многослойного покрытия. Также исследовали влияние плазменного покрытия, нанесенного методом низкотемпературного плазмохимического синтеза [17].

Основным критерием оценки состояния материала был уровень сопротивления усталости. Для оценки влияния технологического воздействия на выносливость проводили усталостные испытания на специальных об-

разцах с наплавкой (рис. 2), моделирующих РЛ. После испытаний разрушенные усталостные образцы подвергли фрактографическому исследованию для определения зоны разрушения и характера развития трещины. Для оценки влияния термического цикла сварки на состояние материала и степени его неоднородности исследовали микроструктуру наплавленных образцов и измеряли микротвердость по сечению.



Рис. 2. Усталостный образец с наплавкой и приваренной защитной наплавкой

Результаты усталостных испытаний образцов, обработанных по различным вариантам технологии, приведены в таблице. На образцах с наплавкой разрушение начиналось с наплавленного металла. Наплавка значительно снижает предел выносливости образцов — с 320 МПа для основного металла до 120 МПа для наплавки. Причины этого — в крупнозернистости литого металла (размер зерен до 2 мм) и растягивающих сварочных остаточных напряжениях. Послесварочная термическая обработка (отпуск) несколько повышает предел выносливости — до 140 МПа за счет уменьшения остаточных напряжений и стабилизации структуры.

Приварка защитных накладок оказывает еще большее вредное воздействие, снижая предел выносливости до 85 МПа. В этом случае очаг разрушения находится в зоне термического влияния соединения основной металл—защитная накладка, микроструктура которой характеризуется крупноигольчатым неотпущенным мартенситом, а микротвердость достигает 5000 МПа. При проведении высокого отпуска происходит распад мартенсита закалки, микротвердость зоны термического влияния падает до 2900 МПа. Снижается уровень растягивающих остаточных напряжений. Это приводит к некоторому повышению предела выносливости — до 100 МПа.

Результаты усталостных испытаний

Технология обработки образцов	Предел выносливости σ_{-1} , МПа на базе $N = 1 \cdot 10^7$ циклов
Основной материал (сталь 20Х13)	320
Наплавка	120
Наплавка + ТО	140
Наплавка с самоотпуском	140
Наплавка в импульсном режиме	280
Наплавка + приварка ЗН	85
Наплавка + ТО + приварка ЗН	85
Наплавка + ТО + приварка ЗН + ТО	100
Наплавка с самоотпуском + приварка ЗН с самоотпуском	100
Наплавка + плазменное покрытие	160
Наплавка + КВИПО	180
Наплавка + ТО + приварка ЗН + ТО + КВИПО	120

Примечание. ТО — термическая обработка; ЗН — защитная накладка; КВИПО — комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка.

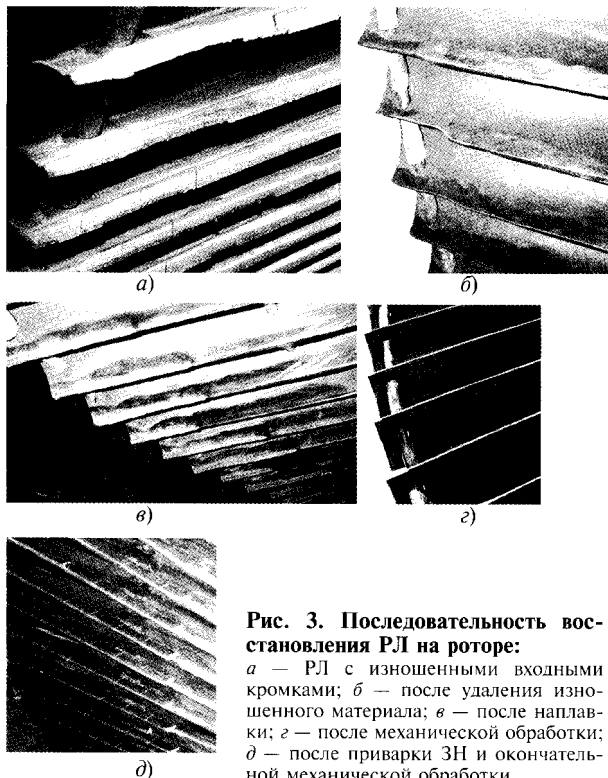


Рис. 3. Последовательность восстановления РЛ на роторе:

a — РЛ с изношенными входными кромками; *b* — после удаления изношенного материала; *в* — после наплавки; *г* — после механической обработки; *д* — после приварки ЗН и окончательной механической обработки

Самоотпуск оказывает такое же положительное влияние на выносливость, что и печная термическая обработка, как при наплавке, так и при приварке защитной накладки.

Самым эффективным средством повышения выносливости наплавленных образцов оказалось применение импульсного режима наплавки — предел выносливости более чем в 2 раза выше, чем при наплавке на постоянном токе — 280 МПа.

Нанесение защитных покрытий значительно повышает выносливость образцов. Это объясняется дополнительным термическим воздействием и упрочнением поверхностного слоя при ионно-плазменной обработке.

Проведенные исследования позволили разработать технологию восстановления стальных РЛ паровых турбин наплавкой, обеспечивающую, за счет применения эффективных технологических приемов и оптимальных режимов, высокие эксплуатационные свойства изделий после восстановления, в частности, сопротивление усталости и эрозионную стойкость. Ее принципиальное отличие от существующих на сегодняшний день технологий восстановления РЛ в том, что она предполагает не только восстановление геометрии, но и дополнительное повышение долговечности изделия.

Технология внедрена в производство, в период 2002...2004 гг. восстановлены РЛ на четырех паровых тур-



Рис. 4. Перо восстановленной РЛ с приваренными защитными наплавками

бинах в системе ОАО "Башкирэнерго". На рис. 3 показана последовательность восстановления РЛ, на рис. 4 — перо восстановленной РЛ с приваренными защитными накладками.

Список литературы

1. Фаддеев И. П. Эрозия влажнопаровых турбин. — Л.: Машиностроение, 1974. — 206 с.
2. Перельман Р. Г., Пряхин В. В. Эрозия элементов паровых турбин. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 184 с.
3. Амелюшкин В. Н. Исследование эрозии рабочих лопаток паровых турбин // Тяжелое машиностроение. — 1991. — № 7. — С. 6—7.
4. Исследование факторов, влияющих на эрозию выходных кромок рабочих лопаток последних ступеней турбины К-200-130 / А. А. Мадоян, В. М. Харабаджи, В. В. Пашенко и др. // Электрические станции. — 1986. — № 11. — С. 26—30.
5. Микунис С. И. Надежность рабочих лопаток последних ступеней ЦНД турбоагрегатов // Электрические станции. — 1998. — № 3. — С. 11—13.
6. Лагереv А. В. Вероятностная оценка падения мощности эродирующей влажно-паровой турбинной ступени в процессе эксплуатации // Известия вузов: Энергетика. — 1991. — № 9. — С. 108—114.
7. Лагереv А. В. Планирование замены эродированных турбинных лопаток // Теплоэнергетика. — 1990. — № 5. — С. 58—60.
8. Фрумн И. И. Восстановление изношенных лопаток паровых турбин // Энергетика и электрификация. — 1974. — № 3. — С. 18—20.
9. Ремонт лопаток паровых турбин после эрозионного износа / Н. А. Погребной, В. Ф. Зозуля, А. М. Бугаев и др. // Технология и организация производства. — 1976. — № 11. — С. 55—57.
10. Гонсеровский Ф. Г. Упрочнение и ремонт стальных паротурбинных рабочих лопаток после эрозионного износа // Электрические станции. — 1988. — № 8. — С. 37—41.
11. Технология ремонта рабочих лопаток паровых турбин / Ф. А. Хромченко, В. А. Лаппа, И. В. Федина и др. // Тяжелое машиностроение. — 1999. — № 8. — С. 14—23.
12. О восстановлении ресурса рабочих лопаток и дисков паровых турбин / Л. А. Жученко, В. В. Кортенко, Ю. А. Сахнин, В. В. Ермолаев // Электрические станции. — 2001. — № 5. — С. 21—24.
13. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона — М.: Машиностроение, 1974. — 767 с.
14. Гонсеровский Ф. Г., Силевич В. М. Техничко-экономическое обоснование способа ремонта эрозионно-изношенных паротурбинных лопаток в условиях электростанций // Тяжелое машиностроение. — 2001. — № 9. — С. 18—22.
15. Смыслов А. М., Дыбленко Ю. М., Смылова М. К. Технология и оборудование для упрочнения большеразмерных лопаток паровых турбин из титановых сплавов // VI Междунар. конф. "Вакуумные технологии и оборудование", Харьков, 21—26 апр. 2003 г. — Харьков: ННЦ ХФТИ "Константа", 2003. — С. 173—177.
16. Смылова М. К., Исанбердин А. Н., Дыбленко М. Ю. Состояние титановых паротурбинных лопаток с защитным покрытием после эксплуатации // Сварка. Контроль. Реновация — 2003: Труды Третьей международной научно-технической конференции, Уфа, 27—31 окт. 2003 г. — Уфа: Гилем, 2003. — С. 255—256.
17. Смыслов А. М., Селиванов К. С. Исследование низкотемпературного плазмохимического синтеза кремнеорганических покрытий с целью повышения эксплуатационных свойств поверхности // Инновационные проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. науч. тр. — Уфа: Гилем, 2003. — С. 210—219.