

УДК 621.79:621.452

**М. К. СМЫСЛОВА, А. Д. МИНГАЖЕВ,
К. С. СЕЛИВАНОВ, А. В. НОВИКОВ**

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ
РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЛОПАТОК ТУРБРОМАШИН
ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

Возникающий в процессе эксплуатации износ лопаток требует проведения либо их преждевременной замены, либо их восстановительного ремонта. При этом, как правило, ремонт лопаток является более рациональным и экономически оправданным решением. В статье рассматриваются вопросы, связанные с исследованием и разработкой новой технологии ремонта лопаток из легированных сталей, включающей в себя несколько вариантов сварочных процессов. *ГТД ; лопатка ; износ ; восстановительный ремонт ; упрочнение ; эксплуатационные свойства ; защитные покрытия*

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что рабочие лопатки компрессора газотурбинных двигателей (ГТД), установок (ГТУ), паровых турбин в процессе эксплуатации подвергаются воздействиям значительных динамических и статических нагрузок, а также коррозионному и эрозионному разрушению.

Исходя из требований, предъявляемых к эксплуатационным свойствам материалов деталей, для изготовления лопаток компрессора газовых турбин применяются высоколегированные хромистые, хромомолибденовые (CrMo), хромомолибденованадиевые (CrMoV) и другие средне- и высоколегированные стали (например, стали марок 20X13, 15X11МФ). Они относятся к числу нержавеющей сталей с содержанием хрома от 11 до 14%, различающихся между собой содержанием легирующих элементов: углерода, молибдена, ванадия. Эти стали широко применяются, например, для изготовления лопаток паровых и газовых турбин, работающих в условиях влажно-паровой среды, при температурах до 500–600°C.

Общеизвестно, что хром в этих сталях является основным легирующим элементом, благоприятно влияющим на коррозионную стойкость. Электрохимический потенциал, при наличии хрома, становится положительным, происходит образование на поверхности металла плотной и достаточно прочной окисной пленки,

которая защищает материал от химической и электрохимической коррозии. При этом хром относится к ферритообразующим элементам, он стабилизирует α -феррит, уменьшает область γ -аустенита. Предельное содержание хрома, при котором еще существуют γ -аустенит – 13%. Введение молибдена и кремния еще больше сужает γ -область, в то же время, аустенитостабилизирующие элементы: углерод, магний, никель – ее расширяют. Кроме того, углерод образует карбиды хрома, обедняя твердый раствор. Наличие углерода при высоком содержании позволяет получать сочетание коррозионной стойкости и различной степени упрочнения при мартенситном превращении. Например, стали 20X13 и 15X11МФ в равновесном состоянии доэвтектоидные. После высокотемпературного нагрева и охлаждения на воздухе или в масле – имеют структуру мартенсита, т. е. относятся к мартенситному классу. Возникающий в процессе эксплуатации износ лопаток требует проведения либо их преждевременной замены, либо их восстановительного ремонта. При этом, как правило, ремонт лопаток является более рациональным и экономически оправданным решением. Наиболее распространенным и практически обоснованным методом восстановительного ремонта является ремонт с использованием сварочных процессов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При разработке технологии сварочных процессов важным фактором является правильный

выбор сварочных материалов с учетом их адаптации к основному материалу лопатки.

Известно [1], что рассмотренные выше хромистые стали свариваются по двум технологическим вариантам с применением:

- сварочных материалов такого же или сходного с основным металлом химического состава;
- присадочных материалов аустенитного или аустенитно-ферритного класса сталей и сплавов.

В первом случае формируется сварное соединение с высокой структурной однородностью и высокой хрупкостью (при отсутствии термической обработки) и высокой прочностью (при проведении термической обработки); во втором случае формируется соединение с различными структурными составляющими, которые не рекомендуется эксплуатировать при температурах выше 500°C.

При сварке плавлением околошовная зона (зона термического влияния) нагревается до температур близких к температуре плавления. В этих условиях избежать химической неоднородности не удастся, что влечет за собой подплавление границ зерен с образованием характерных дефектов, надрывов. Такие дефекты в дальнейшем могут стать очагами разрушения. В этом случае на практике применяют сварочные материалы, температура плавления которых ниже температуры плавления основного металла. При этом создаются условия для заполнения и ликвидации надрывов жидким металлом и снижается опасность образования сварочных трещин. Кроме того, в процессе эксплуатации лопаток в результате воздействия агрессивной внешней среды, высокой температуры, знакопеременных нагрузок, разности давлений на спинке и корыте лопатки и других факторов, возникают процессы проникновения газов и других загрязнений в поверхностный слой материала лопатки. Наличие такого рода загрязнений способствует ухудшению качества наплавленного слоя материала. При этом, особенно при длительной эксплуатации, газовые загрязнения, такие как кислород, азот, углерод, водород и др., могут проникнуть с поверхности в значительный объем основного металла лопатки.

Существуют общие рекомендации по сварке хромистых сталей с подогревом, однако в отдельных случаях можно отказаться от подогрева, если толщина свариваемых изделий не превышает 8...10 мм, а также при использовании аустенитно-ферритной сварочной проволоки и аустенитных сталей и сплавов. При использова-

нии аустенитных электродов отпуск с целью повышения пластичности сварного соединения можно производить не сразу после сварки.

При длительной эксплуатации (более 10 тыс. часов) на поверхности лопаток образуются различного рода дефекты, происходят структурные изменения, ухудшение физико-механических свойств поверхности и основы материала из-за насыщения газами (кислородом, азотом, углеродом, водородом и др.). Дальнейшая эксплуатация таких лопаток становится опасной. Однако восстановив физико-химическое состояние стали и устранив повреждения поверхности лопаток сварочными методами и размерной обработкой, эксплуатацию лопаток можно продолжить. Традиционные способы наплавки, например, с использованием упоров-кристаллизаторов [2–3], осуществляют либо принудительным формированием наплавленного металла путем осаждения в охлаждаемом кристаллизаторе, либо применением ударной нагрузки на сварочную ванночку [4].

При технологии восстановления лопаток наплавкой с использованием медных приспособлений [5] на дефектный участок аргонодуговой сваркой наплавляют слои требуемой высоты сплавом, близким по свойствам к материалу лопаток. При этом перед наплавкой торцы зачищают, затем производят наплавку на постоянном токе. Одним из недостатков приведенных технологий восстановления [2–5] является образование дефектов в виде несплавлений и подрезов при наплавке первого слоя материала. Кроме того, в задачи указанных технологий не входит повышение эксплуатационных свойств восстанавливаемых деталей и их модернизация.

2. ПРИМЕНЕНИЕ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН

Решение проблемы повышения эксплуатационных свойств деталей обеспечивается в технологии восстановления рабочих лопаток [6–8], которая в общем случае включает удаление с лопаток защитных накладок, механическое удаление поврежденного участка кромки, многослойную наплавку восстанавливаемого участка кромки, печную термическую обработку, механическую обработку лопатки и приварку стеллитовых защитных пластин.

В последних случаях [6–8] наблюдается снижение механических свойств, околошовной зоны и, следовательно, механических свойств материала лопатки в целом. При этом исполь-

зуемая термообработка на воздухе не позволяет улучшить качество всего комплекса физико-механических и технологических свойств, а в некоторых случаях приводит к охрупчиванию материала поверхностного слоя.

Поэтому получение при ремонте лопаток из легированных сталей бездефектных границ зон наплавки и наплавленного материала за счет улучшения свариваемости материала детали, а также повышение эксплуатационных свойств лопатки после восстановления, в том числе и по сравнению с исходными свойствами новых деталей, является весьма актуальной задачей.

В этой связи в настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с исследованием и разработкой новой технологии ремонта лопаток из легированных сталей [9]. Предлагаемая технология включает следующие основные стадии: удаление дефектных участков лопатки, дегазация металла лопатки в вакууме в течение не менее 0,5 ч. до восстановления его дислокационной структуры с последующим охлаждением со скоростью от 10 до 50°С/мин при температуре дегазации в пределах диапазона от 200 до 680°С, зависящих от конкретного состояния материала лопатки и ее параметров. Далее производят восстановление геометрии лопатки наплавкой металла и последующую ее размерную механическую обработку. При этом удаление дефектных участков лопатки может осуществляться снятием ее поверхностного дефектного слоя, с последующим проведением механической выборки и разделки лопатки под сварку или наплавку металла.

Разработанная технология предусматривает также проведение после размерной механической обработки лопатки электролитно-плазменного полирование [9–12] и упрочняющей обработки. В зависимости от целей обработки могут использоваться методы поверхностного пластического деформирования с применением микрошариков. Для повышения эксплуатационных свойств деталей технология предусматривает также проведение ионной имплантации и постимплантационного отпуска. В качестве ионов для имплантации могут использоваться ионы Cr, Y, Yb, C, B, Zr, N, La, Ti или их комбинация. Ионная имплантация проводится при энергии ионов 0,2–30 кэВ и дозе имплантации ионов 10^{10} до $5 \cdot 10^{20}$ ион/см² [9].

Применение защитных покрытий в последние годы стало одним из основных методов защиты лопаток ГТД от воздействия различных разрушающих факторов. Однако наиболее эффективно, с точки зрения обеспечения эксплуа-

ционных свойств деталей, формирование защитного покрытия технологиями комплексной защитно-упрочняющей обработки [9, 13, 14]. В этой связи новая технология восстановления лопаток предусматривает нанесение защитных покрытий, комбинируемое с ионной имплантацией. Причем в качестве материала защитного покрытия могут использоваться нитриды металлов Me-N, карбиды металлов Me-C, и карбонитриды металлов Me-CN, а также многослойное защитное покрытие из чередующихся слоев металлов Me и нитридов металлов Me-N, карбидов металлов Me-C карбонитридов металлов Me-NC (где Me – металлы: Ti, Zr, TiZr, N – азот, C – углерод). Толщины слоев многослойного покрытия выбираются из диапазонов: $\delta_{Me} = 0,20 \dots 10$ мкм, $\delta_{Me-N} = 0,10 \dots 6$ мкм (где δ_{Me} – толщина слоя металла, δ_{Me-N} – толщина слоя нитрида металла). Нанесение покрытия осуществляют ионно-плазменными методами и/или электронно-лучевым испарением и конденсацией в вакууме [9].

Применение температурной выдержки в вакууме позволяет произвести дегазацию дефектной зоны, подвергаемой наплавке, что приводит не только к улучшению свариваемости материала лопатки, но и к восстановлению физико-химических и структурных свойств материала поверхностного слоя лопатки. Кроме того, применение дополнительных методов упрочняющей обработки, модифицирования поверхностного слоя материала лопатки и нанесения защитных покрытий, в сочетании с улучшенной, за счет более качественной наплавки материала на изношенные участки лопатки, зоной, позволяют достичь эффекта повышения эксплуатационных свойств лопатки после восстановления. Причем, как показали исследования, применение перечисленных методов упрочнения, модифицирования и нанесения покрытий для деталей, восстановленных традиционными методами [2–5], из-за менее качественной наплавки, осуществляемой без дегазации зон наплавки, не позволяют достичь высоких характеристик деталей. Для оценки характеристик лопаток, восстановленных по разработанной [9] и известным [2–5] технологиям, были проведены исследования их эффективности применительно к ремонтным лопаткам из легированных сталей 20X13 и 15X11МФ. Для повышения достоверности результатов сравнительных испытаний при восстановлении лопаток использовались аналогичные (за исключением отличительных признаков) виды обработки, а также на всех деталях производилось удаление дефектного слоя

металла механической обработкой. Режимы и условия восстановления лопаток из легированных сталей 20X13 и 15X11МФ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы восстановления лопаток				
Номер варианта обработки	Температура нагрева Т, °С	Среда	Время выдержки $\tau_{\text{выд}}$, час	Скорость охлаждения $V_{\text{охл}}$, °С/мин
Известная технология [5]	680	воздух	3	30
Вариант 1	680	вакуум	3	30
Вариант 2	680	вакуум	0,5	20
Вариант 3	200	вакуум	7	10
Вариант 4	500	вакуум	1,5	20
Вариант 5	300	вакуум	5	15
Вариант 6	680	вакуум	1,5	20
Вариант 7	680	вакуум	5	25

Примечание: данные, полученные совместно с ООО «НПП УАСТ»

Для оценки результатов сравнительных испытаний проводился визуальный осмотр, а также исследования с использованием металлографических микроскопов зон наплавки лопаток на предмет обнаружения трещин, пор и других дефектов. Результаты приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Результаты дефектации образцов из сплава 20X13

Режимы восстановления лопаток	Кол-во трещин на мм ²	Максим. длина трещины, мкм
Известная технология [5]	11	5,2
Вариант 1	нет	нет
Вариант 2	нет	нет
Вариант 3	нет	нет
Вариант 4	1	0,2
Вариант 5	1	0,2
Вариант 6	1	0,1
Вариант 7	нет	нет

Анализ результатов сравнительных испытаний показал, что наилучшие свойства восстановленных лопаток были обеспечены при использовании разработанной технологии восстановления деталей. Образцы, обработанные по предлагаемому способу, характеризуются лучшими эксплуатационными свойствами и наи-

меньшим количеством дефектов в наплавленной и приграничной с ней зонах (табл.2, 3).

Таблица 3

Результаты дефектации из сплава 15X11МФ

Режимы восстановления лопаток	Кол-во трещин на мм ²	Максим. длина трещины, мкм
Известная технология [5]	13	7,7
Вариант 1	1	0,2
Вариант 2	2	0,3
Вариант 3	2	1,1
Вариант 4	1	0,4
Вариант 5	2	0,2
Вариант 6	1	0,2
Вариант 7	нет	нет

Таблица 4

Условный предел выносливости σ_{-1} , МПа лопаток после восстановительного ремонта по традиционной и разработанной технологии

Вариант обработки	Традиционная технология	Предлагаемая технология
После восстановления и механической обработки лопаток	90–105	220–240
После обработки микрошариками	100–110	230–250
После имплантации ионов Cr, Y, Yb, C, B, Zr	130–140	260–280
После обработки микрошариками и имплантации ионов Cr, Y, Yb, C, B, Zr	92–104	270–290
После обработки микрошариками и имплантации ионов Cr, Y, Yb, C, B, Zr и нанесения защитного покрытия	84–92	250–270
После обработки микрошариками и имплантации ионов Cr, Y, Yb, C, B, Zr и нанесения защитного многослойного покрытия	86–104	260–280

Дополнительно были проведены испытания на выносливость лопаток в условиях эксплуатационных температур (при 300–450°С) на воздухе. Результаты исследования условного предела выносливости лопаток после восстановительного ремонта приведены в табл. 4.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что традиционное использование упрочняющих видов обработки без соответствующего качества наплавки [2–5] не позволяет достичь достаточно высоких эксплуатационных свойств деталей, а в ряде случаев дает обратный (негативный) эффект (например, снижение предела выносливости (σ_{-1}) до 85–100 МПа. Применение предлагаемой технологии восстановления лопаток из легированных сталей [9–14] позволяет увеличить по сравнению с традиционными технологиями условный предел выносливости (σ_{-1}) с 90–105 МПа до 220–240 МПа, а при применении дополнительных вариантов упрочняющей обработки и нанесения покрытий до 250–270 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патон, Б. Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. академика Патона Б. Е. М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.

2. А.С. СССР № 1680459, В 23 К 9/04, 1989.

3. А.С. СССР №1776511, В 23 К 9/04, 1990.

4. Патент РФ N 2078655, В 23 К 9/04, 1994.

5. Новые технологические процессы и надежность ГТД. Бюллетень. М. ЦИАМ, 1976, № 2 (6), с. 71-73.

6. Хромченко, Ф. А. Технология ремонта рабочих лопаток паровых турбин / Ф. А. Хромченко, В. А. Лаппа, И. В. Федина и др. // Тяжелое машиностроение. 1999. № 8. С. 17.

7. Попов, В. А. Восстановление оборудования ТЭС наплавкой и напылением. Тверь : Центр подготовки персонала ООО Тверьэнерго, 2000. С. 241–243.

8. Гонсеровский, Ф. Г. Упрочнение и ремонт стальных паротурбинных лопаток после эрозионного износа / Ф. Г. Гонсеровский // Электрические станции. 1988. № 8. С. 38.

9. Смыслов, А.М. Способ ремонта лопаток из легированной стали / А. М.Смыслов, М. К.Смылова, А. Д. Мингажев и др. // Положительное решение по заявке на патент на изобретение РФ № 2006137914, В23Р6/00, В23К9/04 от 13.10.2008 г.

10. Смыслов, А.М. Способ электролитно-плазменной обработки детали / А. М. Смыслов, М. К. Смылова, А. Д. Мингажев и др. // Положительное решение по заявке на патент на изобретение РФ № 2007112558, от 26.11.2008 г.

11. Смыслов, А. М. Способ электролитно-плазменной обработки детали / А. М. Смыслов, М. К. Смылова, А. Д. Мингажев и др. // Положительное решение по заявке на патент на изобретение РФ №2007115768. От 20.11.2008 г.

12. Смыслов, А. М. Способ электролитно-плазменного полирования металлических изделий / А. М. Смыслов, М. К. Смылова, А. Д. Мингажев и

др. // Положительное решение по заявке на патент на изобретение РФ №2007115755 от 11.11.2008 г.

13. Смыслов, А. М. Способ защиты лопаток паровых и газовых турбин от солевой и газовой коррозии, газоабразивной и капельно-ударной эрозии / А. М. Смыслов, М. К. Смылова, А. Д. Мингажев и др. // Положительное решение по заявке на патент на изобретение РФ №2005134034. От 15.10.2008 г.

ОБ АВТОРАХ



Смылова Марина Константиновна доц. каф. ОиТСП. Дипл. инж. техн. машиностр. (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по техн. машиностр. (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. высокотвердых вакуумных ионно-плазменных покрытий.



Мингажев Аскар Джамильевич, доц. каф. ТМ. Дипл. инж. по машинам и аппаратам хим. пр-ва (УНИ, 1976). Канд. техн. наук по техн. летательн. аппаратов и двигателей (УГАТУ, 1987). Иссл. в обл. жаростойких и термобарьерных покрытий применит. к деталям авиац. техн.



Селиванов Константин Сергеевич, доц. каф. ТМ. Дипл. инж. по техн. машиностр. (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по техн. машиностр. (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. физ.-хим., структурно-фазового состава и экспл. свойств поверхности деталей.



Новиков Антон Владимирович аспирант каф. ОиТСП. Дипл. инж. по техн. машиностр. (УГАТУ, 1997). Иссл. в обл. восстановления свойств жаропрочн. материалов применением сварочных и термических процессов обработки.