

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

А. М. КОСТИН¹, А. Ю. БУТЕНКО¹, В. В. КВАСНИЦКИЙ²

¹ Национальный университет кораблестроения. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.

E-mail: kostin.weld@gmail.com

² НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, ул. Дашавская, 6/2

Рассмотрены преимущества и недостатки существующих технологий упрочнения контактных поверхностей рабочих лопаток газовых турбин с применением литых прутков стеллита, никелевого сплава КБНХЛ-2, пластин из сплава ХТН-61. Обоснована необходимость разработки нового износостойкого материала для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток. Исследованы два опытных сплава на кобальтовой основе систем Co-Si-B и Co-Si-B-Cr₃C₂. Оценена высокотемпературная износостойкость материалов. Табл. 3, рис. 1.

Ключевые слова: наплавка, лопатки газовых турбин, технологии упрочнения, стеллит, никелевый сплав, сплавы на кобальтовой основе, высокотемпературная износостойкость

На сегодняшний день главной проблемой производства рабочих лопаток современных газотурбинных двигателей является обеспечение их высокой износостойкости и жаропрочности, которые бы обеспечивали требуемые характеристики контактных поверхностей рабочих лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) во всем температурном диапазоне их эксплуатации.

В работе рассматриваются рабочие лопатки, изготавливаемые из литейных никелевых сплавов типа ЧС88У-ВИ, эксплуатационные характеристики которого невысоки, поэтому существует необходимость упрочнения контактных поверхностей (бандажных полок) рабочих лопаток турбин материалами, которые удовлетворяют критериям эксплуатации двигателей.

На предприятиях, изготавливающих газотурбинные двигатели, для придания контактным поверхностям рабочих лопаток необходимых свойств, в частности горячей твердости и износостойкости, используют различные составы и способы упрочнения. Например, известен способ ручной аргоно-дуговой наплавки литыми прутками стеллита на основе кобальта марки Пр-ВЗК-р диаметром 2...3 мм. Данный стеллит характеризуется высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью. Однако рассматриваемая технология имеет ряд существенных недостатков:

– сплавы ЧС88У-ВИ, ЧС70У-ВИ и ЧС104-ВИ относятся к плохо свариваемым, в связи с этим при наплавке электрической дугой образуются трещины, переходящие в основной металл. У стеллита Пр-ВЗК-р и данных никелевых сплавов разные коэффициенты линейного термического

расширения, что приводит при остывании наплавленной детали к возникновению сложных полей собственных напряжений;

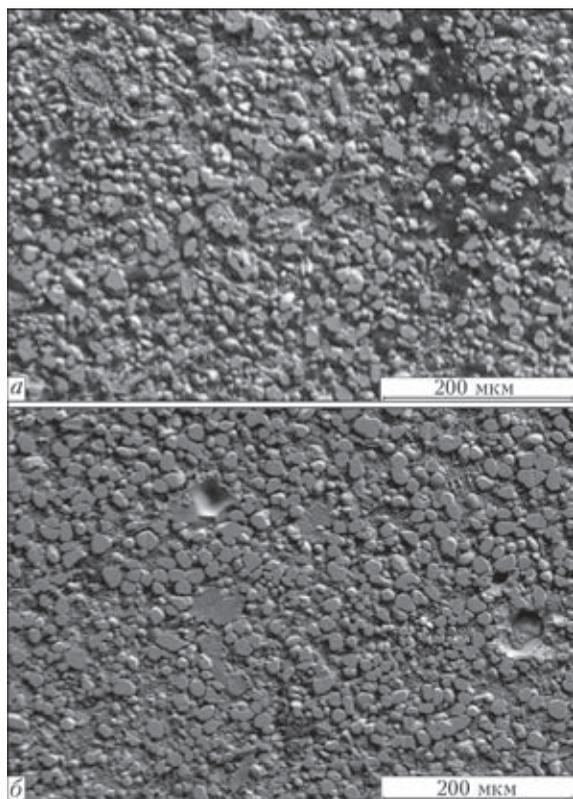
– наплавку деталей выполняют в два прохода для обеспечения необходимой твердости, поскольку при аргоно-дуговой наплавке происходит интенсивное перемешивание стеллита с основным металлом, в результате чего твердость первого слоя не превышает *HRC* 32...35. Наплавка в два прохода приводит к перерасходу дорогостоящего стеллита и увеличению трудоемкости изготовления.

Упрочнение бандажных полок рабочих лопаток ГТД возможно ацетиленокислородной наплавкой никелевым сплавом КБНХЛ-2. В этом случае обеспечивается высокое качество наплавленного металла без внешних и внутренних дефектов со стабильной твердостью *HRC* 60 по всей площади торца либо бандажной полки рабочей лопатки.

Существенным недостатком применения сплава КБНХЛ-2 является то, что при забросах температуры во время эксплуатации двигателя нередко происходит оплавление контактных поверхностей, что в дальнейшем приводит к выходу из строя двигателя в целом.

Проблему жаростойкости и износостойкости бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей можно решить, например, путем применения напайки пластин из сплава на кобальтовой основе ХТН-61, эксплуатация которого возможна при температурах до 1100 °С. Однако, пайка является неприемлемым способом упрочнения лопаток сложной конфигурации.

Таким образом, анализ свойств, эффективных рабочих температур эксплуатации и возможных способов нанесения износостойких материалов



Микроструктура наплавленного слоя упрочняющей композицией №1 (а) и № 2 (б)

показывает, что ни один из существующих промышленных износостойких материалов не удовлетворяет в полной мере техническим требованиям к технологическому процессу упрочнения контактных поверхностей деталей ГТД, рассматриваемых в данной работе. Поэтому необходима разработка нового жаропрочного износостойкого материала для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин, который бы обеспечивал заданные условия их эксплуатации.

К основным критериям разработки нового износостойкого материала для упрочнения контактных поверхностей лопаток можно отнести: высокую жаропрочность; твердость при повышенных

Таблица 1. Режим термообработки опытных образцов

Последовательность выполнения	Температура, °С	Время выдержки, ч
Отжиг	1020	2
Кобальтирование	970±10	6
Алитирование	970±10	6
Диффузионный отжиг в вакууме	1030+10	2
Рекристаллизационный отжиг	1030+10	2
Вакуумный отжиг	1030+10	2
Старение	850±10	16...17

Таблица 2. Результаты измерений твердости упрочняющих композиций

Сплав	Твердость после термообработки HV_{10}	Твердость после термоциклирования HV_{10}
№ 1	752	572
№ 2	606...690	525

температурах эксплуатации не менее $HRC\ 40$; высокотемпературную износостойкость.

Кроме того, основным технологическим критерием при разработке нового упрочняющего материала является температура его плавления, которая не должна превышать $1220\pm 10\ ^\circ\text{C}$. В противном случае не удастся избежать разупрочнения основного металла и образования трещин в переходной зоне.

Для исследований авторами предложены два опытных состава на основе кобальта систем Co-Si-B (№ 1) и $\text{Co-Si-B-Cr}_3\text{C}_2$ (№ 2). Микроструктура наплавки ацетиленокислородным пламенем опытными составами показана на рисунке.

Одной из важных характеристик упрочняющего материала является твердость наплавленного слоя. Авторами определена твердость упрочняющих композиций после термообработки и термоциклирования. Режим термообработки образцов приведен в табл. 1. Режим термоциклирования опытных образцов следующий: начальная и конечная температура — 20 и 1100 °С соответственно; количество циклов — 15...20. Результаты измерений твердости приведены в табл. 2. Анализ результатов показывает, что твердость опытных материалов удовлетворяет эксплуатационным требованиям.

Определение износостойкости проводили на установке, обеспечивающей условия эксплуатации рабочих лопаток ГТД максимально приближенные к реальным. В процессе испытаний образцы находились в условиях динамических соударений при повышенных температурах рабочей среды. Параллельно испытывались опытные образцы из основного металла ЧС88У-ВИ и образцы, наплавленные стеллитом Х30Н50Ю5Т2, максимально эффективным на сегодняшний день для упрочнения рабочих лопаток.

Условия проведения испытаний: температура $\approx 1150\ ^\circ\text{C}$, первоначальная нагрузка — 50 МПа, амплитуда взаимного перемещения — 0,169 мм, время испытаний — 2 ч. Влияние температуры на износостойкость образцов оценивали по результатам испытаний в среде продуктов сгорания авиационного топлива типа «керосин». Для проведения испытаний применяли авиационный керосин марки ТС-1.

Для исключения возможного влияния температуры испытаний на физико-механические свойства исследуемых материалов и последующие результаты оценки износостойкости испытания образцов проводили при контакте только одной исследуемой стороны.

Износостойкость опытных материалов оценивали по интенсивности изнашивания

$$J_v = V/N,$$

Конференция «Сварочные материалы»

где J_V — объемная интенсивность изнашивания, $\text{мм}^3/\text{цикл}$; V — объем изношенного материала (определяется по профилограмме изношенных образцов), мм^3 ; N — количество циклов нагружения (соответствует частоте колебания образцов).

Результаты испытаний высокотемпературной износостойкости приведены в табл. 3.

Анализ результатов испытаний показал, что сплав Х30Н50Ю5Т2 не выдерживает данных динамических и температурных нагрузок. На контактных поверхностях обнаруживается значительное количество окалины, сколов, трещин, вырывов, наплывов, что свидетельствует о разрушении упрочняющего слоя наплавки. Сплав ЧС88У-ВИ и опытные сплавы № 1 и № 2 показывают практически одинаковую стойкость к высокотемпературному износу.

Таким образом, в целом анализ результатов испытаний показал, что при температуре испытаний ≈ 1150 °С, которая близка к температуре растворения γ' -фазы, объемное содержание и морфология упрочняющей дисперсной фазы не играет решающей роли в обеспечении высокой износостойкости упрочняющих композиций. В этом случае

Таблица 3. Результаты измерений интенсивности изнашивания опытных сплавов

Сплав	Время испытания, мин	Средняя интенсивность изнашивания $J_V \cdot 10^{-6}$, $\text{мм}^3/\text{цикл}$
ЧС88У-ВИ	120	2,379
Х30Н50Ю5Т2	60	10,126
№ 1	120	2,761
№ 2	120	2,372

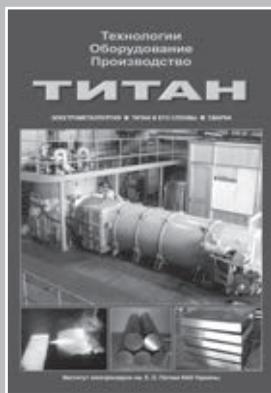
важное значение приобретают свойства твердорастворной основы сплава.

В реальных условиях работы газотурбинного двигателя имеет важное значение не только работоспособность износостойких материалов при запредельных температурных нагрузках, которые составляют минимальный процент от общего времени работы двигателя, но и износостойкость сплавов во время запуска (≈ 20 °С) и особенно при рабочих температурах эксплуатации (≈ 900 °С). Кроме того, известно, что кобальтовые сплавы демонстрируют существенное снижение износостойкости при температурах порядка 500 °С, что требует детальных исследований во всем температурном интервале эксплуатации от 20 до 1150 °С.

Поступила в редакцию 25.04.2014

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. – 270 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 54 статьи, опубликованные в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2011–2013 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана. Представлены обзоры по дисперсионному упрочнению титановых сплавов и по сварке сплавов алюминидов титана. Сборник предназначен для инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка»