

УДК 531

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

© Ю.П.Тарасенко, И.Н.Царева, Л.А.Кривина

Нижегородский филиал Учреждения Российской Академии Наук
Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, ЗАО НПЦ «Трибоника»,
Россия, Нижний Новгород

Аннотация. Разработана комплексная ремонтно-восстановительная технология с применением ионно-плазменных покрытий TiN, предназначенная для повышения надежности и ресурса как новых компрессорных лопаток газотурбинных двигателей, так и отработавших назначенный ресурс. В результате применения восстановительно-упрочняющей технологии с использованием ионно-плазменных покрытий нитрида титана на лопатках, отработавших назначенный ресурс, достигнуто: повышение микротвердости рабочей поверхности в 5-7 раз, улучшение антикоррозионных свойств по показателю питтингостойкости в 3-5 раз, восстановление упруго-пластических свойств материала на 90 %, повышение эрозионной стойкости рабочей поверхности на 25 %, восстановление предела выносливости и продление общего срока службы компрессорных лопаток в 1,8-2 раза.

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, восстановительно-упрочняющая технология, увеличение ресурса.

Компрессорные лопатки являются ответственными деталями газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов. После длительной эксплуатации в условиях эрозионного воздействия воздушного потока при повышенных температурах (200-300 °С) основными видами повреждений лопаточного аппарата являются эрозионный и коррозионный износ рабочей поверхности, а также усталостное разрушение. В настоящее время задача повышения надежности и ресурса компрессорных лопаток решается путем разработки новых марок коррозионностойких высоколегированных сталей и титановых сплавов, а также за счет применения защитных покрытий. При этом покрытие наряду с высокой коррозионной и эрозионной стойкостью должно иметь высокие показатели прочности, пластичности, вязкости разрушения, адгезионной прочности с основой. Данным комплексом свойств обладают полифункциональные ионно-плазменные покрытия нитрида титана, а метод КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой) может успешно использоваться в составе ремонтно-восстановительных и упрочняющих технологий с целью повышения надежности и увеличения срока службы компрессорных лопаток газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов.

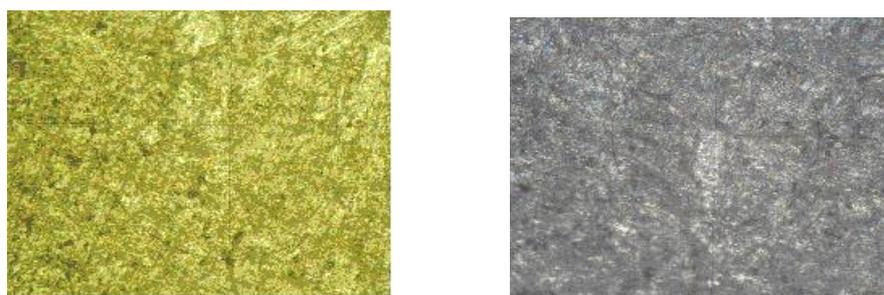
С целью разработки восстановительно-упрочняющей технологии для компрессорных лопаток нами были проведены комплексные исследования постэксплуатационного состояния материала (ст.12X13, 20X13) рабочих лопаток осевого компрессора газотурбинных двигателей импортных газоперекачивающих агрегатов ГТК-25И, ГТК-10И (производства компании «Nuovo Pignone») с разной фактической наработкой (58 000, 60 000, 80 000, 110 000 часов) [1,2].

Визуально-оптическим осмотром было установлено, что в результате

эрозионного воздействия воздушного потока происходит износ защитного покрытия никеля. На отдельных лопатках покрытие сохранялось лишь на 10-20 % площади пера. После снятия эксплуатационных загрязнений (методом электроимпульсной обработки) на поверхности лопаток были обнаружены многочисленные очаги питтинговой коррозии (глубиной 0,05 - 0,3 мм), которые сосредоточены, в основном, в зоне входной кромки со стороны спинки и корыта и в верхней части пера. Плотность питтингов возростала с увеличением номера ступени лопаток. Методом физического моделирования были изучены механизм протекания питтинговой коррозии и его влияние на упруго-пластические свойства материала лопаток [3]. С помощью релаксационных испытаний установлено, что наличие коррозионных дефектов на поверхности приводит к разупрочнению материала, проявляющемся в снижении предела микропластичности (упругости) на 40 % и физического предела текучести - на 20 % по сравнению с исходным состоянием (до эксплуатации). Поэтому сосредоточие таких дефектов в прикорневой части пера лопаток является весьма опасным с точки зрения усталостной прочности, а недооценка коррозионного механизма изнашивания компрессорных лопаток в процессе эксплуатации грозит реальной опасностью их разрушения.

Проведены исследования структурного состояния и физико-механических свойств материала компрессорных лопаток ГТК-25И разных ступеней с увеличением их фактической наработки [1]. Наибольшее внимание было уделено лопаткам 5 ступени, имеющим наименьшее поперечное сечение и испытывающим в процессе эксплуатации наибольшие удельные рабочие нагрузки. Установлено, что фазовый состав стали 12X13 в процессе эксплуатации не меняется и представляет собой сорбитообразный перлит. Однако, в микроструктуре отмечена коагуляция карбидной фазы. Установлено, что после эксплуатации в течение 58000-60000 часов материал лопаток находится в стадии деформационного упрочнения, когда происходит перестройка дислокационной структуры, сопровождающаяся укрупнением субзеренных блоков, возрастанием величины микродеформаций, увеличением (на порядок) плотности дислокаций в сузернах α -Fe, повышением микротвердости поверхности (до 35 %) и физического предела текучести (на 20 %). При увеличении наработки до 80000 часов в результате протекания процессов пластической деформации происходит размельчение внутривузеренной структуры феррита, релаксация микронапряжений, и как следствие, снижение предела микропластичности.

Аналогичные исследования постэксплуатационного состояния были выполнены на компрессорных лопатках разных ступеней газоперекачивающего агрегата ГТК-10И, имеющих наработку 110 000 часов [2]. Обнаружено, что фазовый состав стали 20X13 в процессе эксплуатации не меняется (α -Fe + Fe₃C). Установлены закономерности изменения микроструктуры материала лопаток разных ступеней после эксплуатации. На рисунке 1а приведена микроструктура металла замковой части лопатки 1 ступени, которая наиболее близка к исходному состоянию и представляет собой сорбитообразный перлит с круглозернистой карбидной фазой. Микроструктура материала перовой части, подверженной во время эксплуатации наименьшему тепловому воздействию, аналогична состоянию материала замка (рисунок 1б). Однако, имеют место процессы коагуляции карбидной фазы, проявляющиеся локально.



а

б

Рис. 1 - Микроструктура материала замковой (а) и перовой части (б) рабочей лопатки 1 ступени осевого компрессора ГТК-10И (x 500).

Наибольшие изменения микроструктуры зарегистрированы в перовой части лопаток 5 ступени, подверженных во время эксплуатации наибольшим удельным рабочим нагрузкам (рисунок 2). Перлит имеет пластинчатое строение, отмечено наличие микропористости, характерной для первой стадии накопления повреждений при развитии усталостных процессов.

Методом рентгеноструктурного анализа определены параметры субструктуры феррита в разных зонах компрессорных лопаток. Материал замковой части лопаток имеет крупноблочную структуру ($D \sim 500$ нм) зерна α -Fe с величиной микродеформаций $\epsilon = 0,00082$. Материал рабочей поверхности в зоне, расположенной около галтели и являющейся наиболее опасной с точки зрения нагруженного состояния, отличается более мелкодисперсной субструктурой (размер блоков $D \sim 180$ нм). Размельчение



Рис. 2 – Микроструктура материала пера рабочей лопатки 5 ступени осевого компрессора ГТК-10И (x 500).

субзеренных блоков является следствием протекания пластической деформации при развитии процессов старения материала, проявляющемся в перестройке дислокационных конфигураций и увеличении (почти на порядок с 10^9 до $9,2 \cdot 10^9$ см⁻²) плотности дислокаций на субзеренных границах. В поперечном сечении (на шлифе) перовой части лопатки субструктура аналогична субструктуре материала замка. Это говорит о том, что изменения тонкой структуры имеют место в поверхностном слое и не затрагивают основу материала лопаток.

Микротвердость материала рабочей поверхности лопаток разных ступеней имеет однородное распределение по глубине и находится в пределах 270 – 320

кгс/мм². Повышенные значения $H_u=390$ кгс/мм² зарегистрированы лишь на перовой части лопаток 5 ступени, что обусловлено размельчением субструктуры материала. Микротвердость основы при этом составляет ~ 320 кгс/мм² и соответствует нормируемым значениям.

По результатам механических испытаний на растяжение образцов, вырезанных из перовой части лопаток, предел прочности основного материала составляет $\sigma_b=74,64$ кгс/мм², относительное удлинение $\delta=13,66$ %. В связи с тем, что процессы старения, как правило, развиваются в поверхностном слое деталей, были проведены измерения предела прочности ультразвуковым методом в разных зонах рабочей поверхности лопаток разных ступеней. Максимальные значения предела прочности ($\sigma_b=90-99$ кгс/мм²) зарегистрированы в замковой части лопаток, испытывающей наименьшее воздействие знакопеременных циклических нагрузок. В зоне опасного сечения (вблизи гальтельного перехода) пера лопаток всех ступеней установлены пониженные значения предела прочности ($\sigma_b=74-78$ кгс/мм²). Наибольшее разупрочнение наблюдается в лопатках 5 ступени ($\sigma_b=62-72$ кгс/мм²), обусловленное наиболее интенсивным воздействием термомеханических нагрузок.

На основании анализа постэксплуатационного состояния разработана ремонтно-восстановительная технология для компрессорных лопаток газотурбинных двигателей, включающая: электроимпульсную обработку, механическую обработку, восстановительную термообработку, нанесение ионно-плазменного полифункционального покрытия на основе нитрида титана (методом КИБ).

С целью оптимизации режима напыления наноструктурированных покрытий исследованы структура, физико-механические свойства TiN, полученных в широком интервале технологических параметров (парциальное давление реакционного газа, ток дуги, опорное напряжение) [4]. Получены оптимизированные покрытия TiN с фазовым составом ($\delta\text{-TiN}+\alpha\text{-Ti}$), размером субзерна $D\sim 30$ нм, обладающих высокими показателями микротвердости (~ 2000 кгс/мм²) и коэффициента пластичности ($\delta_H=0,8$).

Для оптимизации режимов формирования антикоррозионных покрытий были исследованы коррозионные свойства нитрида титана, полученного в интервале низких парциальных давлений реакционного газа (0,04-0,1) Па [5]. Установлено, что в исследуемом диапазоне давлений осаждаются покрытия с фазовым составом: $\delta\text{-TiN}+\alpha\text{-Ti}$. С уменьшением давления реакционного газа выявлена тенденция формирования аксиальной текстуры типа (001). Получены наноструктурированные покрытия с размером блоков мозаики 25-28 нм (таблица 1). При снижении давления реакционного газа до 0,04 Па наблюдается повышение уровня микродеформаций в зернах TiN, и как следствие, увеличение микротвердости (таблица 1). Покрытия, формируемые в интервале давлений 0,06-0,1 Па, не проявляют микрохрупкости при индентировании и имеют высокий показатель пластичности $\delta_H=0,81-0,84$, что выгодно отличает их от защитных гальванических покрытий твердого хрома ($\delta_H=0,77$ при таких же значениях твердости), имеющих склонность к растрескиванию при знакопеременных нагрузках. С точки зрения антикоррозионной защиты, наиболее оптимально получение покрытия при давлении 0,1 Па. Нанесение ионно-плазменного покрытия TiN в указанном режиме на поверхность образцов из стали 12X13 способствовало существенному повышению потенциала питтингообразования E_p и базисов питтингостойкости ΔE_p , ΔE_{rep} (таблица 2) поверхности. Нитрид титана в данном случае выполняет функцию катодного покрытия и обеспечивает существенное повышение коррозионной стойкости стальных поверхностей.

Таблица 1- Параметры субструктуры и механические характеристики покрытий нитрида титана, полученных при разных парциальных давлениях реакционного газа в камере.

Давление газа P, Па	Величина микродеформаций ε (+/- 0,00001)	Размер субзерен D (+/- 2), нм	Микротвердость H_{μ} (+/- 0,3), ГПа	Коэффициент пластичности δ_H
0,04	0,00034	27	16,6	0,67
0,06	0,00008	27	8,2	0,84
0,08	0,00002	28	9,6	0,81
0,10	0,00002	25	8,4	0,83

Таблица 2 - Показатели питтингостойкости стали 12X13 и покрытий TiN, полученных при разных давлениях реакционного газа в камере.

Материал	Показатели питтингостойкости, В				
	$E_{кор}$	$E_{п}$	$E_{реп}$	$\Delta E_{п}$	$\Delta E_{реп}$
Сталь 12X13	-0,21	-0,096	-0,348	0,114	-0,138
Покрытие TiN, полученное при разных давлениях реакционного газа:					
P=0,04 Па	-0,010	0,069	0,010	0,070	0,011
P=0,06 Па	-0,138	0,025	-0,090	0,163	0,152
P=0,08 Па	-0,076	0,180	-0,067	0,256	0,010
P=0,1 Па	-0,360	0,533	-0,300	0,893	0,060

На основании проведенных исследований была разработана комплексная ремонтно-восстановительная технология с применением ионно-плазменных покрытий TiN, предназначенная для повышения надежности и ресурса как новых компрессорных лопаток газотурбинных двигателей, так и отработавших назначенный ресурс. В результате применения восстановительно-упрочняющей технологии с использованием ионно-плазменных покрытий нитрида титана на лопатках, отработавших назначенный ресурс, достигнуто: повышение микротвердости рабочей поверхности в 5-7 раз, улучшение антикоррозионных свойств по показателю питтингостойкости в 3-5 раз, восстановление упруго-пластических свойств материала на 90 %, повышение эрозионной стойкости рабочей поверхности на 25 %, восстановление предела выносливости и продление общего срока службы компрессорных лопаток в 1,8-2 раза [6,7].

Данная технология через ЗАО НПЦ «Трибоника» внедрена на предприятиях ООО «Волготрансгаз» и ООО «Севергазпром» ОАО «Газпром» для продления срока службы рабочих лопаток осевого компрессора газотурбинных двигателей ГТК-25И и ГТК-10И. В настоящее время 32 комплекта (~29500 шт.) восстановленных лопаток отработали второй назначенный ресурс (50 000 часов).

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (гос. контракт №4702р/4113 от 15.01.07) [8].

Литература

1. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Щеголев И.Л., Проскуряков А.М. Оценка эксплуатационного состояния материала компрессорных лопаток ГТК-25И и разработка ремонтно-восстановительной технологии с применением ионно-плазменных покрытий // Сбор. науч. тр. III межд. конф. «Энергодиагностика и condition monitoring», Н.Новгород, 2000, с.96-102.
2. Царева И.Н., Бердник О.Б., Тарасенко Ю.П., Фель Я.А. Исследование постэксплуатационного состояния материала компрессорных лопаток газотурбинного двигателя ГТК-10И // Материалы 5 Междунар. конф. «Прочность и разрушение материалов и конструкций», 12-14 марта 2008, Оренбург, т.2, с.196-200.
3. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Кривина Л.А., Тренин В.Ф. Исследование эксплуатационного состояния компрессорных лопаток газоперекачивающих агрегатов и технология восстановления его работоспособности // Сбор. науч. тр. межд. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях», Кацевели, 2000, с.257-258.
4. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Романов И.Г., Кривина Л.А., Подлеснов А.И. Влияние условий ионно-плазменного напыления на структуру, механические и фрикционные свойства покрытий нитрида титана // Эл.журнал «Трение, износ и смазка», С.-Петербург, 2000, т.2, №1 (2).
5. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Федорова Е.А., Леванов Ю.К. Исследование физико-химических и коррозионных свойств ионно-плазменных покрытий нитрида титана, полученных при разных парциальных давлениях реакционного газа // Физика и химия обработки материалов, 2006, №3, с.63-67.
6. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Фель Я.А., Тарасенко П.Ю., Мышляев Д.А. Компрессорная лопатка газотурбинного двигателя с защитным покрытием // Патент РФ на полезную модель № 63004, 2006.
7. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А. Ремонтно-восстановительная технология с применением плазменных покрытий для лопаток газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов // Материалы 10-й Междунар. научно-практической конф. «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки», ч.1, С.-Петербург, 2008, с.542-551.
8. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Сорокин В.А., Бердник О.Б., Кривина Л.А., Фель Я.А. Отработка технологии и организация производства компрессорных лопаток повышенной надежности и долговечности с ионно-плазменными покрытиями для газотурбинных двигателей // Отчет по НИОКР, рег.№ 01.2006.09082.

Поступила: 17.12.2010.