

УДК 621.431.75

О ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ СОСТОЯНИИ И ПРОДЛЕНИИ РЕСУРСА КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГТЭ-45-3

© 2014 Ю. П. Тарасенко, О. Б. Бердник, И. Н. Царёва

Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород

Рабочие лопатки компрессоров газотурбинных двигателей являются наиболее ответственными деталями среди всех узлов газотурбинных энергетических установок. Они изготавливаются из хромистых нержавеющей сталей. Основными видами повреждений компрессорных лопаток при длительной эксплуатации являются эрозионный и коррозионный износ рабочей поверхности, а также усталостное разрушение. Целью данной работы являлась разработка методов восстановления работоспособности материала компрессорных лопаток энергетической установки ГТЭ-45-3 с целью продления их срока службы. Для изучения постэксплуатационного состояния компрессорных лопаток и работоспособности материала были исследованы рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя энергетической установки ГТЭ-45-3 после отработки назначенного ресурса с наработкой 50 000 часов, изготовленные из коррозионно-стойких сталей ЭИ961 (13X11H2B2MФ) и 12X13. Для оценки работоспособности материала лопаток использовали нестандартный подход и оригинальные методики. В статье приведены результаты исследований микроструктуры и физико-механических свойств коррозионно-стойких сталей. Разработан технологический процесс восстановления работоспособности материалов с целью продления ресурса лопаток компрессора, включающий последовательность операций: механическая обработка для удаления механических и коррозионных дефектов, аргоно-дуговая наплавка для восстановления геометрических размеров лопаток, термический отпуск для снятия остаточных напряжений.

Газотурбинная энергетическая установка, компрессорные лопатки, карбидная фаза, релаксационные испытания, предел текучести, термическая обработка, продление ресурса.

Введение

Рабочие лопатки компрессоров газотурбинных двигателей являются наиболее ответственными деталями среди всех узлов газотурбинных энергетических установок. Они изготавливаются из хромистых нержавеющей сталей. Основными видами повреждений компрессорных лопаток при длительной эксплуатации являются эрозионный и коррозионный износ рабочей поверхности, а также усталостное разрушение. Газотурбинные энергетические машины ГТЭ-45-3 и ГТЭ-35-770-2 для тепловых электростанций Якутии были сконструированы ещё в 80-е годы прошлого столетия. В настоящее время они до сих пор находятся в эксплуатации, при этом фактическая наработка лопаточного аппарата превышает назначенный ресурс. В связи с этим остро стоит вопрос о разработке высокотехнологичных и энергосберегающих методов продления ресурса, что позволит снизить затраты на замену теплонапря-

жённых узлов энергетического оборудования. Поэтому разработка ремонтно-восстановительных технологий, основанных на научном анализе постэксплуатационного состояния материала компрессорных лопаток, является своего рода «скорой помощью» в критической ситуации, когда нет возможности замены на новые установки или отдельные узлы. Целью данной работы являлась разработка методов восстановления работоспособности материала компрессорных лопаток энергетической установки ГТЭ-45-3 с целью продления их срока службы.

Методика исследований

Для изучения постэксплуатационного состояния компрессорных лопаток и работоспособности материала были исследованы рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя энергетической установки ГТЭ-45-3 после отработки назначенного ресурса с наработкой 50 000

часов, изготовленные из коррозионно-стойких сталей ЭИ961 (13X11Н2В2МФ) и 12Х13.

Микроструктурные исследования выполнены на электронном микроскопе «ТЕSCAN/VEGA». Твёрдость по Виккерсу материала определяли ультразвуковым твердомером МЕТ-У1 по ГОСТ 22761-77.

Для оценки работоспособности материала лопаток использовали нестандартный подход и оригинальные методики. Предел прочности материала определяли неразрушающим методом с помощью ультразвукового твердомера МЕТ-У1 по ГОСТ 22761-77 непосредственно с рабочей поверхности лопаток, так как процессы деградации материала и накопления дефектов развиваются, как правило, в поверхностной зоне детали. Для определения физического предела текучести σ_T и предела микропластичности σ_0 (или предела упругости) использовали метод релаксационных испытаний [1] на оригинальной автоматизированной установке высокой жёсткости «Релаксометр» с использованием программного обеспечения АУР1. Для этого были вырезаны миниатюрные образцы размером $2,7 \times 2,7 \times 6,0$ мм из зоны выходной кромки лопаток, подверженной при эксплуатации наибольшим температурным и механическим нагрузкам, а также воздействию коррозионной среды и эрозионного потока. Данный подход более правомерен по сравнению с использованием стандартного метода испытаний на растяжение, так как испытания более крупных образцов, вырезанных из срединной части пера, дают усреднённые данные для более глубоких слоёв основного материала и не отражают реальную ситуацию.

Результаты исследований

Объектом исследования являлись лопатки осевого компрессора газотурбинного двигателя газотурбинной энергетической установки ГТЭ-45-3 после эксплуатации в реальных условиях работы тепловой станции. Визуально-оптическим осмотром установлено, что в процессе

эксплуатации на поверхности рабочих лопаток компрессора образуются дефекты эрозионного, механического и коррозионного происхождения: забоины, изгибы и износ входной и выходной кромок, разрывы металла, вмятины. На рабочей поверхности пера обнаружены многочисленные очаги питтинговой коррозии, преимущественно со стороны корыта. Фото лопаток после эксплуатации представлены на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Внешний вид рабочих лопаток 3 и 10 ступеней компрессора после эксплуатации:
а – ЭИ961, б – 12Х13

Компрессорные лопатки 1–4 ступеней были изготовлены из стали ЭИ961 (13X11Н2В2МФ). Сталь ЭИ961 – жаропрочная (нержавеющая) высоколегированная сталь мартенситного класса, предназначенная для изготовления нагруженных деталей, длительно работающих при температуре до 600 °С.

Анализ микроструктуры показал, что материал лопаток 1–4-й ступеней после эксплуатации находится в удовлетворительном состоянии. Выделения упрочняющей карбидной фазы в виде прерывистых включений (размером 0,1–0,2 мкм) расположены по границам зёрен, по телу зерна видны крупные карбиды размером 0,5–1 мкм, единичные включения имеют размер до 5 мкм. Микротрещин по границам зёрен не обнаружено (рис. 2). Размер зерна основной фазы (мартенсита) соответствует требованиям, предъявляемым к данному типу штамповок.

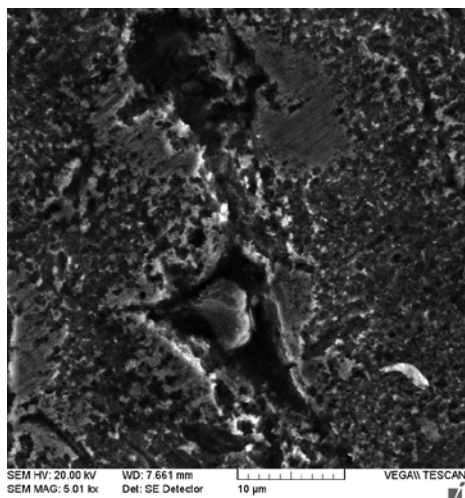


Рис. 2. Микроструктура стали ЭИ961 после эксплуатации (X5000)

Компрессорные лопатки разных ступеней работают при различных температурах в интервале от 100 до 400 °С. С увеличением температуры эксплуатации механические свойства материала при увеличении времени эксплуатации начинают изменяться и возрастает вероятность хрупкого разрушения. Используя справочные данные [2] физических свойств стали ЭИ961, по методике, предложенной в работе [3], был рассчитан коэффициент пластичности при разных температурах по формуле:

$$\delta_n = 1 - 14,3(1 - \nu - 2\nu^2)(\text{НВ}/E),$$

где $\nu=0,3$ – коэффициент Пуассона [2], E – модуль Юнга, НВ – твёрдость.

Проведённые расчёты показали, что нагрев стали ЭИ961 выше 400 °С приводит к снижению коэффициента пластичности δ_n ниже 0,8, что способствует ухудшению пластических свойств материала (табл. 1).

На основании анализа постэксплуатационного состояния лопаток 1–4 ступеней, изготовленных из стали ЭИ961, был разработан технологический процесс восстановления работоспособности материала и продления ресурса лопаток, включающий последовательность операций: механическая обработка для удаления механических и коррозионных дефектов, аргоно-дуговая наплавка проволокой ЭИ400 для восстановления геометрических размеров лопаток, термический отпуск при температуре 600 °С в течение двух часов для снятия остаточных напряжений.

Таблица 1. Значение коэффициента пластичности для стали ЭИ961 при разных температурах

Температура, °С	Модуль Юнга E , ГПа	Твёрдость НВ , ГПа	Коэффициент пластичности δ_n
20	200	4,30	0,840
100	198	4,30	0,838
200	187	4,32	0,828
300	175	4,20	0,821
400	165	4,32	0,805
500	145	3,90	0,799
600	109	3,80	0,740

Микроструктура основного материала восстановленных лопаток приведена на рис. 3. После проведения термического отпуска изменений фазового состава стали ЭИ961 не наблюдается. Достигнуто улучшение гомогенности микроструктуры. Границы зёрен – чёткие и ровные, упрочнены равномерно распределённой по границам карбидной фазой с размером включений от 0,1 до 1 мкм.

В табл. 2 приведены механические характеристики стали ЭИ961, полученные из релаксационных испытаний, в постэксплуатационном состоянии и после термического отпуска.

После термической обработки установлено снижение предела микропластичности и предела текучести на 20 и 8 % соответственно, при этом средние значения соответствуют требованиям ТУ 3619-020-90351370-2013 на данную сталь.

Результаты измерений твёрдости и предела прочности представлены в табл. 3. В постэксплуатационном состоянии твёрдость находится в пределах от 2,30 до 2,62 ГПа. После проведения термического отпуска установлено выравнивание значений твёрдости по перу лопатки и незначительное снижение (на 3 %) предела

прочности. Полученные показатели механических свойств соответствуют нормам ТУ (HV=2,00 – 4,50 ГПа, предел прочности - не ниже 850 МПа). Твёрдость металла в наплавленной зоне после термического отпуска составляет HV=2,33 ГПа, что также соответствует требованиям ТУ.

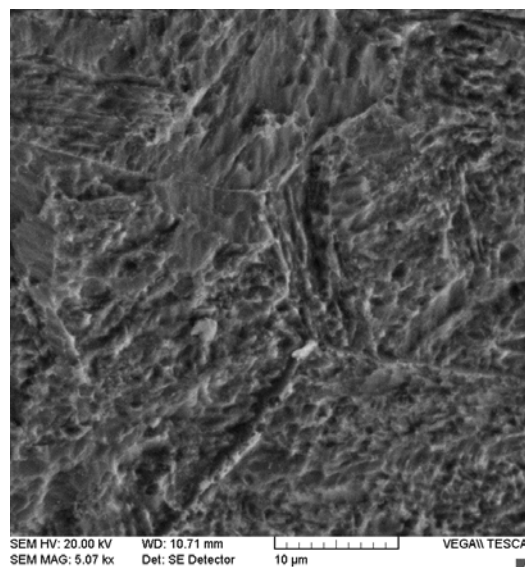


Рис. 3. Микроструктура стали ЭИ961 после термического отпуска (X5000)

Таблица 2. Механические характеристики стали ЭИ961, полученные из релаксационных испытаний

Состояние материала	№ образца	σ_0 , МПа	σ_T , МПа
После эксплуатации	1	310	735
	2	330	775
	3	310	735
Среднее значение		317	750
После термического отпуска	4	225	700
	5	270	680
Среднее значение		250	690

Таблица 3. Результаты измерений твёрдости и предела прочности материала рабочих лопаток компрессора

Образец	Место измерения	Твёрдость HV, ГПа	Предел прочности, σ_B , МПа
После эксплуатации	Середина пера	2,50	920
	Выходная кромка	2,40	
	Входная кромка	2,30	
	Замковая часть	2,62	970
После термического отпуска	Середина пера	2,50	890
	Выходная кромка	2,52	
	Входная кромка	2,52	
	Замковая часть	2,50	920

Лопатки 6–16-й ступеней компрессора были изготовлены из стали 12X13. Согласно ГОСТ 5632-72 сталь 12X13 [2] имеет повышенную пластичность и рекомендована для изготовления деталей, подвергающихся ударным нагрузкам и воздействию относительно слабых агрессивных сред (атмосферные осадки, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре). Важным свойством стали 12X13 является высокий декремент затухания – способность гасить упругие колебания. 12-процентные хромистые стали с небольшим содержанием $C \sim 0,1\%$ при медленном охлаждении с высоких температур приобретают перлитно-ферритную структуру.

При визуально-оптическом осмотре на лопатках после эксплуатации обнаружены механические дефекты в виде забоин, геометрических нарушений профиля и кромок пера, а также очаги точечной питтинговой коррозии. Трещин не обнаружено.

Методом оптической металлографии установлено, что материал лопаток в постэксплуатационном состоянии имеет кондиционную микроструктуру. Однако отмечается появление микропористости и гетерогенности в микроструктуре, проявляющейся в коагуляции карбидной фазы (рис.4).



Рис. 4. Микроструктура материала рабочей лопатки компрессора ГТЭ-45-3 из стали 12X13 в постэксплуатационном состоянии (X500)

Данное состояние микроструктуры ухудшает пластические свойства материала. Для устранения признаков деградации структуры и повышения её гомогенности необходимо проведение восстановительной термической обработки.

Установлено, что основной материал имеет твёрдость $HV=3,40$ ГПа. Вблизи рабочей поверхности (на глубине 15 мкм) пера материал лопаток имеет пониженные по сравнению с основой значения твёрдости $HV=2,30-2,50$ ГПа, обусловленные воздействием повышенных температур и коррозионной среды. Для удаления повреждённого поверхностного слоя необходимо проведение механической обработки посредством тонкого шлифования и полирования. Для восстановления профиля и геометрических размеров в зонах входной и выходной кромок были проведены наплавочные работы методом аргонодуговой сварки проволокой 04X19H11M3 с последующим термическим отпуском при температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение двух часов. Микроструктура стали после термического отпуска представлена на рис. 5.

После проведения восстановительных работ твёрдость материала перовой части лопаток разных ступеней понизилась и составляет $HV=1,55-1,65$ ГПа.

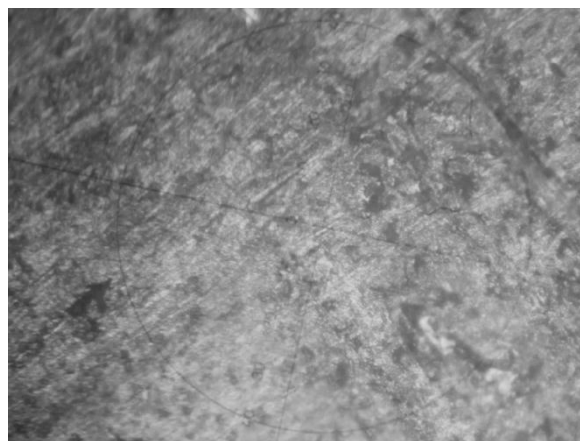


Рис. 5. Микроструктура материала рабочей лопатки компрессора ГТЭ-45-3 из стали 12X13 после термического отпуска ($700\text{ }^{\circ}\text{C} - 2$ часа) (X500)

Снижение твёрдости способствует повышению пластических свойств и понижает риск охрупчивания материала при дальнейшей эксплуатации. Предел текучести, определённый из релаксационных испытаний, составляет 435 МПа. Предел прочности материала лопаток разных ступеней находится в пределах 620–680 МПа. Полученные показатели механических свойств соответствуют требованиям, предъявляемым к данной марке стали [2].

В табл. 4 приведены механические характеристики стали 12X13, полученные из релаксационных испытаний в постэксплуатационном состоянии и после термического отпуска. Установлено увеличение среднего значения предела микропластичности после термообработки на 40 %. Это означает, что пластическая деформация в микрообъёмах будет происходить

при более высоких напряжениях, что повышает работоспособность материала.

После проведения последовательности ремонтно-восстановительных работ (механическая обработка, аргонодуговая наплавка, термический отпуск) был проведён выходной контроль методом цветной капиллярной дефектоскопии (набор пенетрантов OVERCHECK). По результатам контроля дефектов на поверхности лопаток не обнаружено (рис. 6). Комплект компрессорных лопаток, восстановленных по данной технологии, поставлен в повторную эксплуатацию (с назначенным ресурсом 40 000 часов) на тепловую электростанцию и в настоящее время проходит натурные испытания. Работа выполнена при финансовой поддержке ОАО «Якутская энергоремонтная компания».

Таблица 4. Механические характеристики стали 12X13, полученные из релаксационных кривых

Состояние материала	№ образца	σ_0 , МПа	σ_T , МПа
После эксплуатации	1	165	440
	2	120	420
Среднее значение		142	430
После термического отпуска	3	200	450
	4	205	420
Среднее значение		202,5	435



Рис. 6. Внешний вид восстановленных компрессорных лопаток ГТЭ-45-3 после проведения цветной капиллярной дефектоскопии

Заключение

Анализ постэксплуатационного состояния рабочих лопаток осевого компрессора энергетической установки ГТЭ-45-3 показал, что материал не имеет недопустимых повреждений, но его микроструктура имеет деградированное состояние, проявляющееся в гетерогенности микроструктуры (в стали ЭИ961) и коагу-

ляции карбидной фазы (в стали 12X13). Дальнейшая надёжность работы таких лопаток не может быть гарантирована. На основании проведённых исследований разработана технология продления их ресурса, включающая последовательность операций: механическую обработку, аргонодуговую наплавку и термический отпуск.

Библиографический список

1. Скуднов В.А., Чегуров М.К. Релаксация напряжений в металлах и сплавах: метод. пособие. Н. Новгород: НГТУ, 2010. 30 с.

2. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и

сплавов. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

3. Мильман Ю.В., Голанов Б.А., Чугунова С.И. Характеристика пластичности, получаемая при измерении твердости. Киев, 1992. 25 с.

Информация об авторах

Тарасенко Юрий Павлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Бердник Ольга Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru

ka@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

Царёва Ирина Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: упрочняющие и восстановительные технологии, плазменные покрытия, физическое материаловедение, трибология, физика плазмы.

POST-OPERATION STATE AND EXTENSION OF SERVICE LIFE OF COMPRESSOR BLADES OF THE GAS-TURBINE POWER PLANT GTE-45-3

© 2014 Y. P. Tarasenko, O. B. Berdник, I. N. Tsareva

Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Science,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

Gas turbine engine compressor blades are the most essential parts among all the units of gas turbine power plants. They are made of chromium stainless steels. Erosive and corrosive wear of working surfaces as well as thermal stress fatigue are the main types of damage of compressor blades after long-term use. The aim of this work was to develop methods of recovering the serviceability of the material of the power plant ГТЭ-45-3 compressor blades with a view to extending their service life. To examine the post-operation state of compressor

blades and the material serviceability the compressor blades of the gas turbine engine power plant ГТЭ-45-3 made of corrosion-resistant steels ЭИ961 (13X11H2B2MФ) and 12X13 were investigated after their service life expired with the total engine hours equal to 50000. To evaluate the serviceability of the blade material an unconventional approach and know-how were used. The results of analysis of the microstructure of corrosion-resistant steels as well as their physical and mechanical properties are presented in the paper. A process of material serviceability recovery is developed with a view to extending the service life of compressor blades. The process includes the following sequence of operations: machining aimed at removing corrosion and mechanical defects, argon-arc welding that restores the geometry of the rotor blades, thermal tempering for removing residual stress.

Gas-turbine power plant, compressor blades, carbide phase, relaxation tests, yield point, heat treatment, service life extension.

References

1. Skudnov V.A., Chegurov M.K. *Relaksatsiya napryazheniy v metallakh i splavakh. Metodicheskoe posobie [Relaxation of tension in metals and alloys. Teaching aid].* Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod St. Tech. Univ. Publ., 2010. 30 p.
2. Zubchenko A.S., Cones M.M., Kashirsky Yu.V. et. all. *Marochnik staley i splavov [Steel and Alloy Grade Guide].* Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.
3. Milman Yu.V., Golanov B.A., Chugunova S.I. *Kharakteristika plastichnosti, poluchaemaya pri izmerenii tverdosti [Plasticity characteristic, obtained in measuring hardness].* Kiev: Publ., 1992. 25 p.

About the authors

Tarasenko Yury Pavlovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Berdnik Olga Borisovna, Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Tsareva Irina Nikolaevna, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, strengthening and recovery technologies, plasma coatings, material physics, physics of plasma.