

ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ЛОПАТОК ТУРБИНЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ГТК-25И

© 2006 И.Н. Царева, Ю.П. Тарасенко, Я.А.Фель

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Проведено комплексное изучение состояния материала лопаток турбины низкого давления (ТНД) импортного газоперекачивающего агрегата ГТК-25И из жаропрочного никелевого сплава ЦНК-7РС после эксплуатации с фактической наработкой 21186 часов. Анализ полученных результатов позволил сформулировать основные принципы, определяющие основу ремонтно-восстановительной технологии продления общего ресурса лопаток турбины низкого давления,

Введение.

Среди всех узлов газотурбинных двигателей самыми ответственными деталями являются турбинные лопатки. При эксплуатации они подвержены высокотемпературному нагреву, действию циклических нагрузок и воздействию агрессивной среды. В процессе длительного многократного нагружения в материале лопаток протекают процессы усталости, которые ограничивают их ресурс. В свою очередь, своевременно и правильно проведенные ремонтно-восстановительные работы позволяют существенно повысить срок эксплуатации турбинных лопаток. В работе изучено изменение состояния материала турбинных лопаток газоперекачивающих агрегатов и предложена технология продления их ресурса.

Методика исследования.

Проведено комплексное изучение состояния материала лопаток турбины низкого давления (ТНД) импортного газоперекачивающего агрегата ГТК-25И (из жаропрочного никелевого сплава ЦНК-7РС) после эксплуатации с фактической наработкой 21 186 часов. При исследованиях использованы разнообразные физические методы: рентгеноструктурный анализ (на дифрактометре Дрон - 3М в геометрии «скользящего» пучка, $\text{Cu-K}\alpha$ -излучение), оптическая металлография (на оптическом микроскопе Неофот-32), испытания механических свойств (микротвердость, предел прочности, ударная вязкость, длительная прочность).

Результаты исследований.

Лопатки ТНД (рис.1) изготавливаются методом точного литья из жаропрочного

никелевого сплава, представляющего собой твердый раствор легирующих элементов,

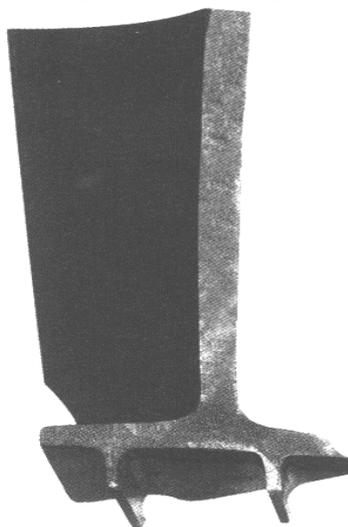


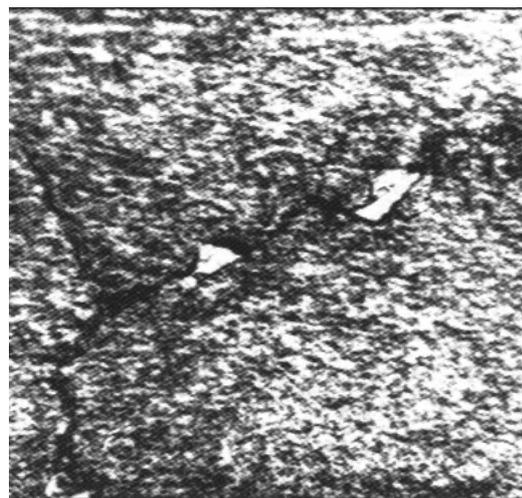
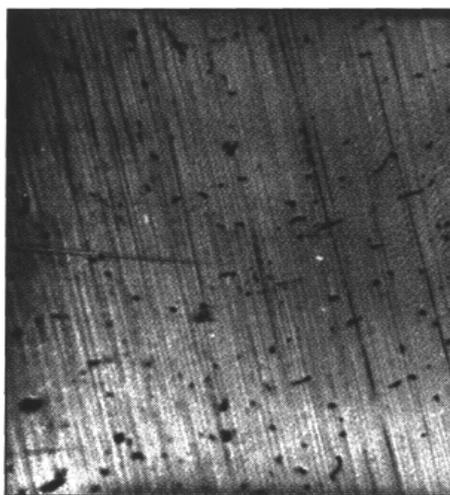
Рис.1. Лопатка турбины низкого давления ГТК-25И

карбидных и интерметаллидной фаз в никелевой матрице. Распределение мелкодисперсных включений этих фаз в поперечном сечении лопатки показано на рис.2 а. Располагаясь по границам зерен металла (рис.2 б), они приводят к упрочнению материала и обеспечению жаропрочных свойств. Контрольным химическим анализом установлено, что материал лопаток содержит 0,08% С; 17,0% Cr; 7,8% Co; 8,5% W; 3,6% Al; 2,8% Ti; 0,7% Mo; 0,19% Fe (Ni-основа). Результаты анализа показали, что элементный состав имеет отклонение от оптимального состава сплава марки ЦНК-7РС (+2,2% Cr; -1,0% Co; +1,7% W; -0,4% Al; -1,2% Ti; +0,3 % Mo. Уменьшение количества алюминия и титана должно приводить к снижению содержания интерметаллидной γ' - фазы. При металло-

графическом исследовании выявлено, что микроструктура основы металла лопаток после эксплуатации радикальных изменений не претерпевает и практически соответствует исходному состоянию для данного сплава. Не было обнаружено в объеме лопаток и несплошностей металла в виде макро-, микротрещин и пористости.

Заметные изменения микроструктуры затрагивают лишь поверхностные слои детали. Во-первых, в результате длительного воздействия среды горючих газов в условиях высоких температур на рабочей поверх-

ности пера лопаток образуется окисный слой и коррозионные дефекты полусферической формы (глубиной 5...20 мкм). Толщина поврежденного слоя может достигать 40 мкм (рис.3). Рентгеновским фазовым анализом установлено образование в поверхности соединений типа Ni_3C , WC , Cr_3C_2 и окислов типа $NiCr_2O_4$. В результате повышенного содержания этих окискарбидных фаз поверхностный слой лопаток обладает худшей травимостью и проявляется в виде светлой полосы на фотографиях поперечных шлифов лопатки (см. рис.3).



а
б
Рис.2. Микроструктура металла лопатки ТНД ($\times 200$):
а – распределение и дисперсность карбидных фаз;
б – строение границ зерен с карбидными и боридными включениями

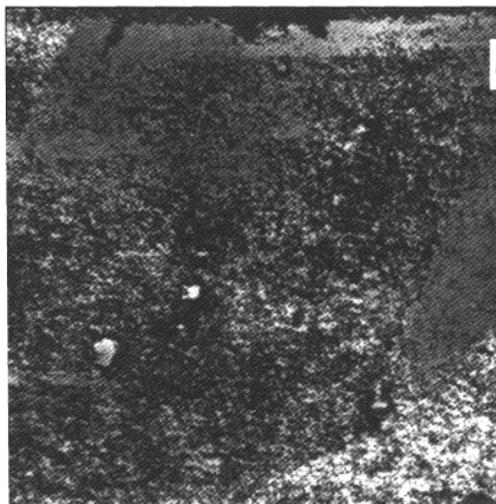


Рис.3. Дефектный слой на поверхности лопатки ТНД со стороны корыта ($\times 500$)

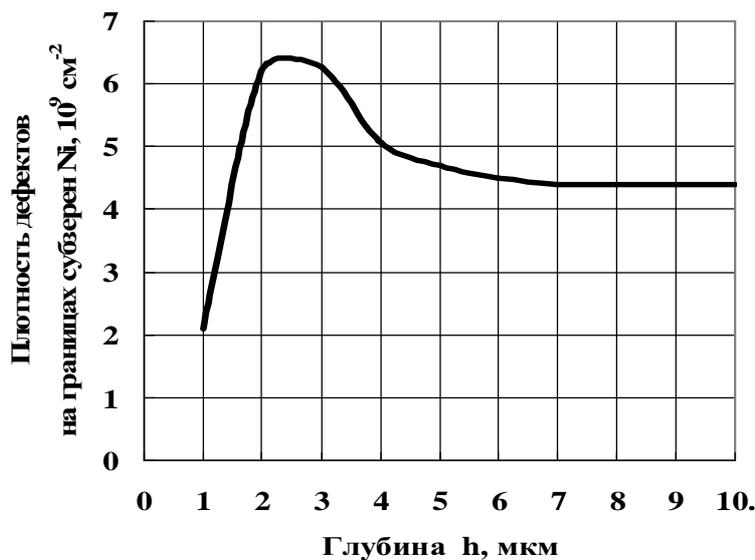


Рис. 4. Распределение плотности дислокаций на границах субзерен никеля по глубине рабочей поверхности пера лопатки ТНД

Методом рентгенографии установлено, что в процессе длительной эксплуатации происходит постепенный распад интерметаллидного соединения Ni_3Al в сплаве ЦНК-7РС. Изменения затрагивают и тонкую структуру зерен основного металла. В результате воздействия знакопеременных рабочих напряжений в материале протекают процессы пластической деформации, приводящие к размельчению субзерен никелевой фазы. Более, чем на порядок возрастает плотность линейных дефектов на их границах. Послойным рентгеновским сканированием установлено, что максимальная концентрация дефектов дислокационного типа соответствует глубине ~ 3 мкм (рис.4). Изменения субструктуры затрагивают поверхностный слой спинки пера, замковой части и зону входной кромки. Наибольшие изменения зарегистрированы на рабочей поверхности спинки.

Установлено увеличение микродеформаций в зернах основного металла (в 1,7 и в 2,7 раза в замковой и перовой части лопатки соответственно). Внутреннее же сечение металла пера по параметрам субструктуры практически соответствует исходному состоянию.

По результатам исследования распределения микротвердости установлено значительное (до 60%) увеличение микротвердости материала рабочей поверхности (см. рис.5 а). Это свидетельствует о деформационном старении в микрообъемах сплава в процессе эксплуатации. Выявлена корреляция профиля микротвердости от глубины с послойным распределением плотности субзеренных дислокаций. Максимум твердости наблюдается на глубине $\sim 1,5$ мкм. Затем твердость плавно снижается до значений исходного состояния. Из профиля микротвердости по поперечному шлифу (см. рис.5 б) установлена глубина деформированно-упрочненного слоя (~ 100 мкм).

Из значений микротвердости упрочненной зоны и основного металла определены показатели пластичности. Установлено, что в результате многократного механического и термического нагружения в процессе эксплуатации коэффициент пластичности

материала поверхностного слоя пера лопатки ТНД снижается со значения $\delta_H=0,88$ (в исходном состоянии) до $\delta_H=0,63$. Известно, что при $\delta_H<0,75$ в металлах и сплавах значительно возрастает вероятность хрупкого разрушения.

Механические свойства (предел прочности σ_B , сужение δ , ударная вязкость a_K , микротвердость H_{μ}) (табл.1) во внутренних слоях пера и замка остаются после длительной эксплуатации практически неизменными и соответствуют требованиям нормативно-технической документации на данный сплав.

Из анализа результатов проведенных исследований установлено, что при фактической наработке ~ 21 000 часов в материале лопаток ТНД развиваются процессы старения, проявляющиеся в деформационном упрочнении поверхностного слоя, деградации микро- и субструктуры. Дальнейшая эксплуатация турбинных лопаток будет продолжаться за счет уменьшения запаса пластичности, перехода поверхностного слоя в режим ускоренной стадии ползучести и увеличения вероятности хрупкого разрушения.

Анализ полученных результатов позволил сформулировать основные принципы, определяющие основу ремонтно-восстановительной технологии продления общего ресурса лопаток турбины низкого давления, а именно:

- удаление дефектного поверхностного слоя;
- разработка релаксационной режимов термической обработки для восстановления микроструктуры, выравнивания химической и фазовой неоднородности сплава;
- отработка технологии нанесения диффузионных коррозионно-жаростойких покрытий с повышенными характеристиками с целью восстановления геометрии поверхности и придания ей повышенных теплозащитных свойств.

Для удаления окисленного и деформационно-упрочненного поверхностных слоев с профиля пера лопаток освоена тонкая микрошлифовка. Авторская электроимпульсная полировка с экологически чистыми нетра-

диционными составами позволяет снимать дополнительный наклеп поверхностного слоя после шлифования и обеспечивает доводку чистоты поверхности до $R_a < 0,63$ мкм. В качестве восстановительной предло-

жена модифицированная термообработка (ТО) по полному циклу применительно к конкретной марке жаропрочного сплава.

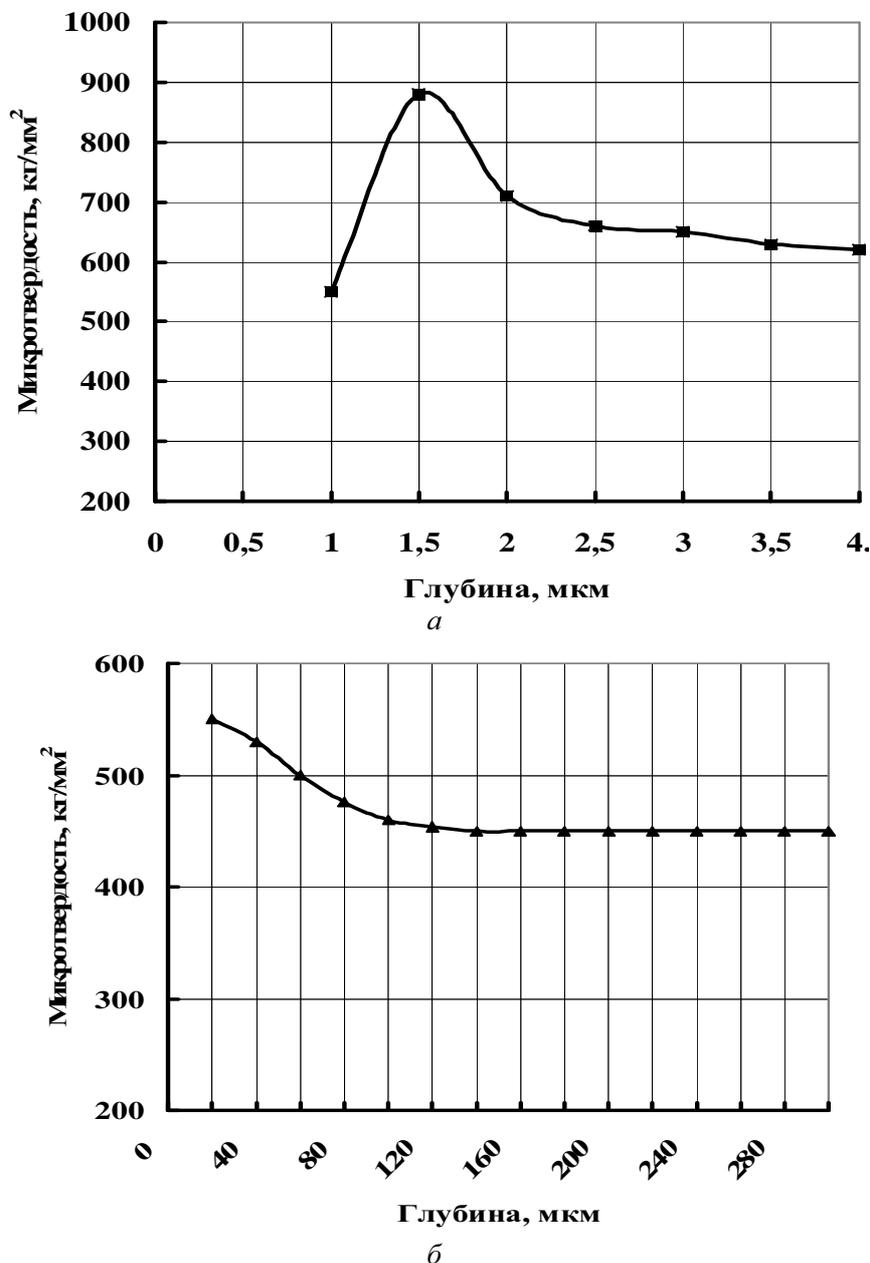


Рис.5. Профиль микротвердости по глубине деформационно-упрочненного слоя на рабочей поверхности пера лопатки ТНД со стороны спинки: а – измерения с поверхности, б – измерения по поперечному шлифу

Исследования по влиянию ТО, проведенные на сплаве ЦНК-7РС, дали хороший эффект по релаксации свойств материала лопатки ТНД. Данные рентгенографии показали, что после термообработки в никелевой матрице возрастает количество упрочняющей интерметаллидной фазы Ni_3Al , обеспечивающей жаропрочные свой-

ства сплава. Испытания механических свойств после проведенной штатной термообработки показали в целом улучшение основных показателей механических свойств пера лопатки, а именно, повышение характеристик прочности и пластичности при незначительном снижении микротвердости. Следует отметить, что коэффициент пла-

стичности материала восстанавливается относительно исходного состояния, в среднем, на 92 % и выравнивается по лопатке, находясь в интервале значений $\delta_H=0,80\dots 0,82$

для перовой и замковой части соответственно (для материала до эксплуатации $\delta_H=0,88$).

Таблица 1. Показатели механических свойств материала лопаток ТНД после эксплуатации и восстановительной термообработки

Зона лопатки	Состояние материала	Микро-твердость на шлифе H_{100} , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Ударная вязкость a_n , Н/м	Удлинение δ , %	Коэффициент пластичности δ_H , отн.ед.
Перо	После эксплуатации	5500	805	2200	2,5	0,63
	После термообработки	5000	850	---	5	0,81
Замок	После эксплуатации	4500	786	2800	6,6	0,77
	После термообработки	4400	850	---	2	0,82

Эффективность применения данного подхода была подтверждена испытаниями лопаток ТНД из жаропрочного никелевого сплава ЦНК-7РС (комплект 049 агрегата ГТК-25И) на длительную прочность, проведенными в соответствии с ГОСТ 10145-81 при температуре 900°C и рабочем напряжении 250 МПа. Результаты испытаний показали, что применение восстановительной ТО для лопаток, отработавших назначенный ре-

сурсный срок, показали увеличение работоспособности материала по показателю времени до разрушения на 18% (с 16,7 часов до 19,7 часов).

Разработанная технология апробирована и внедрена в ООО «Волготрансгаз ОАО «Газпром». По данной технологии отремонтировано 3 комплекта рабочих лопаток ТНД для газоперекачивающих агрегатов ГТК-10И.

POSTOPERATIONAL CONDITION ANALYSIS AND OVERHAL-PERIOD RENEWAL TECHNOLOGY OF BLADES IN GAS TURBINE ENGINES AND GAS-COMPRESSOR UNITS

© 2006 I.N. Tsareva, Y.P. Tarasenko, Y.A. Fel

Scientific and Production Center "Tribonika", NN MERI of RAS

The condition of a material blades of the turbine of units after operation with a different operating time is investigated. The technology of prolongation of a resource blades is developed.