

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛА ЛОПАТОК ТВД

**Бердник О.Б., Царева И.Н.**

*Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН) – филиал ФИЦ  
Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН), Нижний Новгород,  
Россия, berdник80@mail.ru*

Повышение ресурса и надежности рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) является актуальной комплексной проблемой современного двигателестроения. Комплексное решение этой проблемы связано с необходимостью улучшения функциональных характеристик поверхности деталей, в сочетании с повышением материало- и энергосбережения, обеспечением экологичности и безопасности ремонтных технологий.

Наиболее типичными видами повреждений лопаток турбин при длительной эксплуатации являются: отслоения и эрозионный износ защитного покрытия; коррозионные дефекты на рабочей поверхности; забоины механического происхождения; утонение кромок; термоусталостные трещины, выкрашивания и сколы металла; изменения геометрии в связи с потерей устойчивости при термоциклическом нагружении; хрупкое разрушение лопаток из малоэластичных материалов при попадании в проточную часть турбины посторонних предметов.

Из анализа результатов проведенных ранее исследований установлено, что при наработке ~ 30000 часов в материале лопаток ТВД развиваются процессы старения, проявляющиеся в деформационном упрочнении поверхностного слоя, деградациии микро- и субструктуры. Дальнейшая эксплуатация будет продолжаться за счет уменьшения запаса пластичности материала.

Анализ микроструктуры проводили на образцах, вырезанных из наиболее нагруженной перовой части лопаток ТВД. Микроструктура сплава In738 крупнозернистая равноосная литая; имеет вид и состав, характерный для никелевых сплавов. Границы зерен ровные, не искажены и упрочнены выделениями карбидной и боридной фазами разной дисперсности. Основными структурными составляющими сплава являются  $\gamma$ -твердый раствор легирующих элементов в никеле и  $\gamma'$ -фаза типа сложного интерметаллида  $Ni_3(AlTi)$ . Кроме того, в основном металле зафиксировано наличие интерметаллидных фаз  $Ni_3Al$  и  $Ni_3Ti$ , карбидных фаз  $Ni_3C$ ,  $Cr_{23}C_6$ ,  $TiC$ ,  $WC$ . Присутствие указанных соединений в сплаве In738 подтверждается его химическим составом и обеспечивается закономерной кинетикой фазовых изменений при литье, термообработке (ТО) и последующей эксплуатации. Структура материала лопаток в постэксплуатационном состоянии деградирована,  $\gamma'$ -фаза подвержена коагуляции в процессе эксплуатации и неоднородна по размеру зерен (от 100 до 1000 нм). Объемное содержание  $\gamma'$ -фазы типа  $Ni_3(Al Ti)$  ~ 45 % и ~ 1,2 % карбидов, карбонитридов, боридов, которые имеют различную дисперсность и располагаются как внутри зерен, так и по их границам. Наблюдаются выделения отдельных крупных карбидов по границам зерен, в некоторых местах они образуют сетку, что приводит к охрупчиванию границ.

Микротвердость материала лопаток в постэксплуатационном состоянии измеряли при нагрузке 2 Н на поперечных шлифах по трем зонам на пере: вершина, центр, пригальтельная область и на замковой части. Получили следующий результат: на вершине перовой части – 530 кгс/мм<sup>2</sup>; в центре – 430 кгс/мм<sup>2</sup>; в пригальтельной зоне – 695 кгс/мм<sup>2</sup>; замковой части – 580 кгс/мм<sup>2</sup>. Неоднородность полученных значений по телу лопатки говорит о том, что в процессе эксплуатации материал претерпевал структурные изменения неравномерно, а в зависимости от влияния внешних факторов, таких как температура и сила газового потока.

Механические свойства во внутренних слоях перовой и замковой частей остаются после длительной эксплуатации практически неизменными (предел прочности для перовой части  $\sigma_{в,}$  = 670 МПа, относительное удлинение  $\delta$  -3,0 %; для замковой части:  $\sigma_{в,}$  = 850 МПа,  $\delta$  -3,9 %) и по прочностным характеристикам не

соответствуют требованиям нормативно-технической документации на данный сплав ( $\sigma_{в.} \geq 800$  МПа,  $\delta \geq 3,0$  %).

Анализ полученных результатов позволил сформулировать основные принципы, определяющие основу восстановительной технологии продления общего ресурса лопаток ТВД, а именно: удаление дефектного поверхностного слоя; разработка релаксационных режимов термической обработки для восстановления микроструктуры, выравнивания фазовой неоднородности сплава.

Микроструктура границ зерен имеет первостепенное значение при интеркристаллитном разрушении. Интеркристаллитное разрушения происходит в более крупнозернистых материалах, также оказывает влияние распределение зернограницных карбидов. Для повышения длительной пластичности никелевых сплавов эффективна оптимизация их зернограницной структуры путем замедленного охлаждения на первом этапе закалки. В этом случае формируются искривленные «зубчатые» границы зерен, заполненные чередующимися частицами выделений карбидов и  $\gamma'$ - фазы. Искривленные границы, образующиеся в процессе термической обработки, приводят к повышению жаропрочности, в частности связанного с торможением процессов межзеренного проскальзывания.

Предлагаемые режимы термической обработки для получения оптимальных свойств материала изделия и результаты проведенных экспериментов представлены в таблице 1 [1]. Из полученных данных видно, что после проведения ТО значения микротвердости по всему объему лопатки выравниваются, снижаясь ~ на 9 %. На рис. 1 представлено распределения микротвердости по телу лопатки в постэксплуатационном состоянии и после ТО. На графиках выделились три пика, соответствующие микротвердости матрицы – 487 – 451 кг/мм<sup>2</sup>, карбидной фазы – 532 кг/мм<sup>2</sup> и интерметаллидной фазы – 628 кг/мм<sup>2</sup>. Видно, что после термообработки пики для замковой и перовой частей лопатки совпадают.

Таблица 1 - Сводная таблица результатов экспериментов

№	Режим ТО	Зона	Н <sub>200</sub> , кг/мм <sup>2</sup> ( $\epsilon=1,5-6$ %)		$\delta_n$		$\epsilon_e$ , %	
			после экспл.	посл е ТО	после экспл.	после ТО	после экспл.	после ТО
1	Т <sub>з</sub> = 1200°С, $\tau_{в.д.}$ =2 ч, охл. с печью 90 мин (V <sub>охл</sub> = 3 °С/мин) до 1000°С	перо	487	478	0,820	0,824	0,0130	0,0128
		замок	457	520	0,831	0,808	0,0122	0,0139
2	Т <sub>з</sub> = 1140°С, $\tau_{в.д.}$ =2 ч, охл.с печью 90 мин (V <sub>охл</sub> = 2°С/мин) до 1000°С	перо	328	430	0,879	0,841	0,0088	0,0115
		замок	576	304	0,787	0,888	0,0154	0,0081
3	Т <sub>з</sub> =1200°С, $\tau_{в.д.}$ =2 ч, охл. с печью 30 мин (V <sub>охл</sub> = 7 °С/мин) до 1000°С	перо	529	484	0,805	0,821	0,0141	0,0129
		замок	584	548	0,784	0,798	0,0156	0,0147
4	Т <sub>з</sub> = 1140°С, $\tau_{в.д.}$ =2 ч, охл. с печью 30 мин (V <sub>охл</sub> = 5°С/мин) до 1000°С	перо	462	481	0,830	0,822	0,0124	0,0129
		замок	547	434	0,798	0,840	0,0146	0,0116
5	Т <sub>з</sub> =1200°С, $\tau_{в.д.}$ =2 ч, охл. с печью 90 мин (V <sub>охл</sub> = 5 °С/мин) до 800 °С	перо	695	632	0,744	0,767	0,0186	0,0169
		замок	520	507	0,808	0,813	0,0139	0,0136
6	Т <sub>з</sub> =1140 °С, $\tau_{в.д.}$ =2 ч, охл.с печью 90 мин (V <sub>охл</sub> = 4 °С/мин) до 800°С,	перо	433	571	0,840	0,789	0,0116	0,0153
		замок	541	497	0,800	0,817	0,0145	0,0133
7	Т <sub>з</sub> =1200°С, $\tau_{в.д.}$ =2ч, охл. с печью 30 минут (V <sub>охл</sub> =15°С/мин) до 800°С	перо	474	457	0,825	0,831	0,0127	0,0122
		замок	463	478	0,829	0,824	0,0124	0,0128
8	Т <sub>з</sub> = 1140°С, $\tau_{в.д.}$ =2 ч, охл. с печью 30 мин (V <sub>охл</sub> =12°С/мин) до 800°С,	перо	483	452	0,822	0,830	0,0129	0,0124
		замок	539	490	0,801	0,819	0,0144	0,0131
9	Т <sub>з</sub> =1170°С, $\tau_{в.д.}$ =2 ч, охл. с печью 60 мин (V <sub>охл</sub> = 4,5°С/мин) до 900°С	перо	620	649	0,771	0,760	0,0166	0,0174
		замок	587	632	0,783	0,767	0,0157	0,0169

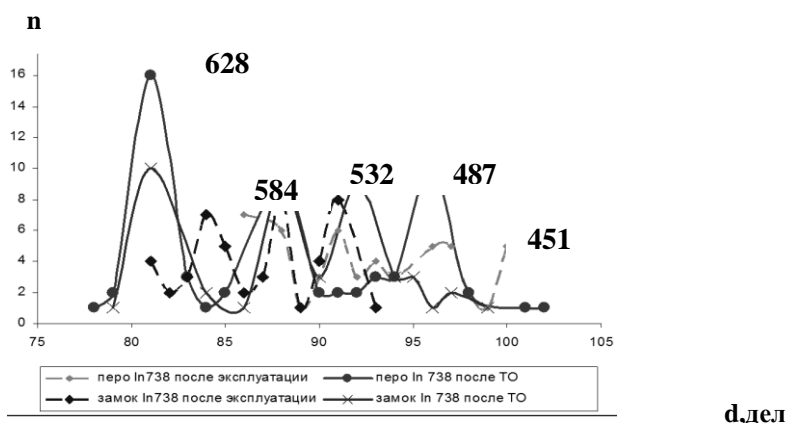


Рисунок 1 – График распределения микротвердости материала лопатки в постэксплуатационном состоянии и после термической обработки

После проведения ТО получаем следующие результаты: микроструктура материала имеет дисперсную структуру (50-150) нм. Извилистые границы зерен образуются в процессе двухступенчатого охлаждения от температуры закалки: на первом этапе – со скоростью 2 – 5 °С/мин, на втором этапе – на воздухе. Затем проводится заключительное старение сплавов. Формирование таких границ зерен связано с выделением  $\gamma'$ - фазы в виде крупных частиц, декорированных мелкими дискретными карбидами  $M_6C$ ,  $M_23C_6$ . При данном режиме охлаждения, получаем оптимальное значение микротвердости  $\sim 550$  кг/мм<sup>2</sup>. Границы зерен упрочнены мелкодисперсными выделениями карбидной ( $\sim 4$  мкм) фазы, бориды и карбонитриды которые располагаются как внутри зерен, так и по их границам в виде единичных скоагулированных или прерывистых выделений; упрочняющая  $\gamma'$  фаза наблюдается в виде частиц различной дисперсности (50-250) нм, объемное содержание  $\gamma'$ -фазы составляет в материале  $\sim 67\%$ .

Наиболее благоприятная скорость охлаждения на первом этапе с печью –  $V_{\text{охл}} = 2,5 - 5$  °С/мин, На основании экспериментальных значений микротвердости, приведенных, рассчитаны характеристики пластичности (коэффициент пластичности -  $\delta_n$  и упругая деформация -  $\varepsilon_e$ ), получаемые при измерении твердости (таблица 1).

#### ВЫВОДЫ

Проанализировано постэксплуатационное состояние материала рабочих лопаток ТВД. Основными дефектами является разрушение материала перовой части вследствие высокотемпературной коррозии. Проанализировано изменение механических характеристик в процессе эксплуатации материала лопаток ТВД и после термической обработки.

Подобран режим термической обработки для получения микроструктуры «зубчатых» границ зерен. Установлено, что наибольшее искривление («зубчатость») границ получается при ступенчатом охлаждении от температуры закалки: на первом этапе – со скоростью 2,5-5 °С/мин (с печью), на втором этапе – на воздухе. Затем проводится заключительное старение сплавов. «Зубчатость» границ зависит от времени первого этапа медленного охлаждения. Оптимальным является - 90 минут. После ТО по выбранным режимам выравнивается значение микротвердости материала, что подтверждается изменениями в микроструктуре, подтверждающее однородное распределение упрочняющих фаз, измельчение карбидной фазы.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 гг. по теме № 0035-2014-0401 (№ госрегистрации 01201458049).*

#### Литература

1.Бердник О.Б., Тарасенко Ю.П. Оптимизация режима термической обработки для продления ресурса лопаток турбин высокого давления./ Материаловедение, №5, 2012, с.24-29.