

УДК 621

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Баранов С.А, Круцило В.Г.

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия*

*Проведен анализ влияния напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя на эксплуатационные характеристики деталей газотурбинных двигателей. Показана высокая эффективность процесса термопластического упрочнения деталей, работающих в экспериментальных условиях. Проведены результаты усталостных испытаний лопаток газоперекачивающих агрегатов.*

*Ключевые слова: остаточные напряжения, пластические деформации, релаксация*

Повышение выносливости и надежности деталей машин, особенно работающих при высоких температурах. В настоящее время является актуальной проблемой. Анализ причин аварий авиационной техники последних лет позволяет сделать заключение, что разрушение таких деталей, как лопатки, диски, дефлектора газотурбинных двигателей, часто связано с проявлением негативного влияния деформационного упрочнения (наклепа), возникающего в результате механического обработки, а также при уточнении методами поверхностного пластического деформирования с целью наведения остаточных напряжения сжатия.

Методы поверхностного пластического деформирования нашли широкое применение в машиностроении. Установлено, что за счет наклепа возрастают усталостные характеристики упрочнённых деталей, однако более детальное изучение этого вопроса показало, что наклеп оказывает негативное влияние. Известно, что для деталей, работающих при нормальной температуре, упрочнение (ППД) приводит к росту предела выносливости. Это кажущееся противоречие объясняется весьма просто: возникающие остаточные напряжения, сжатия, не только перекрывают негативное влияние наклепа, но и увеличивают сопротивляемость образованию микро и макротрещин при знакопеременных нагрузках.

Особо вредное влияние наклепа проявляется при повышенных и высоких температурах. В пластически деформированном поверхностном слое детали возрастает скорость диффузии. Диффузия вызывает разрыхление граничных слоев (зерен), снижая их прочность. При повышении температуры увеличиваются частота и энергия колебаний атомов и, следовательно, их подвижность. Наблюдается коагуляция упрочняющих фаз, усиливаются рекристаллизационные процессы и т.д.

Наведенные остаточные напряжения релаксируют. Например, при упрочнении микрошариками образцов из весьма стабильного жаропрочного сплава ЖС6Ф, формируются остаточные напряжения сжатия величиной  $\sigma_{\bullet} = 1100$  МПа. В атмосфере аргона при  $T = 950^{\circ}\text{C}$  через  $t = 2$  ч. выдержки они релаксируют до  $\sigma_{\bullet} = 700$  МПа, а через  $t = 50$  ч практически полностью исчезают.

В связи с изложенным последние годы на предприятиях Самарской области относительно широко начали внедрять процесс "Термопластическое упрочнение" (ТПУ). Характерной особенностью этого процесса является возможность формирования благоприятного напряженно-деформированного состояния при минимальных значениях деформационного упрочнения, не превосходящих одного процента относительной деформации. Деформации столь незначительны, что обычными методами (например, с помощью прибора ПМТ-3) степень деформационного упрочнения определить не удастся.

С целью внедрения процесса "Термопластического упрочнения" были проведены обширные исследования на образцах и натурных изделиях, разработаны математические модели процесса наведения остаточных напряжений и их релаксации в процессе эксплуатации, изучены микроструктурные изменения в упрочненном слое, обоснованы оптимальные режимы упрочнения.

При исследованиях на образцах было установлено, что для широкого класса жаропрочных материалов (ЭИ 437Б, ЭИ 598, ЖС6К, ЖС6ФН и др.) при ТПУ формируются остаточные напряжения сжатия на уровне  $\sigma_{\bullet} = -(600 \dots 1000)$  МПа с максимумом у поверхности.

Глубина проникновения ветви остаточных напряжений зависит от масштабного фактора (толщины образцов) и составляет,  $\Delta a = 150 \dots 300$  мкм и более.

Усталостные испытания образцов позволили установить весьма важные закономерности:

1. Термопластическое упрочнение значительно повышает предел выносливости при испытаниях, как при комнатной, так и при повышенных температурах. Так, для сплава ЭИ598 неупрочненные образцы показали предел выносливости  $\sigma_{-1} = 410$  МПа, упрочненные ТПУ  $\sigma_{-1} = 580$  МПа (база испытаний  $N = 5 \cdot 10$  циклов,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ). Повышение выносливости составило 40%. При повышенных температурах испытаний относительный прирост выносливости увеличивается. К примеру, аналогичные образцы, испытанные при  $T = 750^{\circ}\text{C}$  показали соответственно:  $\sigma_{-1} = 220$  МПа и  $\sigma_{-1} = 400$  МПа, т.е. на 80% больше. При этом установлено, что с увеличением базы испытаний относительный прирост выносливости растет.

Аналогичные результаты полученные при испытаниях образцов из сплавов ЭИ 437Б, ЖС6У, ЖС6ФН.

2. Остаточные напряжения, наведенные методом ТПУ весьма стабильны и слабо релаксируют при рабочих температурах. Образцы из сплава ЖС6ФН,

упрочненные ТПУ, запаянные в трубки и среди аргона, выдерживались при  $T=950^{\circ}\text{C}$  в течение 25,50,75,100 ч

Исследования показали, что после 75 ч релаксации остаточных напряжений практически прекращается и находится на уровне 35%, т.е. исходные напряжения  $\sigma_0 = -800$  МПа релаксируют до  $\sigma_0 = -500$  МПа оставаясь на необходимом уровне.

Релаксация остаточных напряжений исследовалась и в условиях циклических нагружений. Образцы из сплава ЭИ598 испытывались при  $T=650^{\circ}\text{C}$  рабочие напряжения составляли  $\sigma = 350$  МПа с асимметрией  $\sigma = 150$  МПа. После испытания в течение  $T = 60$  ч. Исходные остаточные напряжения  $\sigma_0 = -900$  МПа релаксировали до значений  $\sigma_0 = -(600 \dots 700)$  МПа, т.е. снижение составило 25...35%.

3. Термопластическое упрочнение весьма эффективно для деталей с концентраторами. Так, например, круглые образцы из сплава ЖС6ФН с направленной кристаллизацией, изготовленные по технологии лопаток с концентраторами  $r = 0,3$  мм, испытанные при  $T=950^{\circ}\text{C}$  на базе  $N = 5 \times 10^6$  циклов показали  $\sigma_{-1} = 230$  МПа. Упрочнение этих образцов методом ТПУ повысило предел выносливости до  $\sigma_{-1} = 310$  МПа, или на 35%.

Закономерности, установленные при ТПУ образцов, практически также проявляются и при упрочнении натуральных изделий.

Модифицированные двигатели серии (НК-12СТ) используются в агрегатах газоперекачивающих станций. Некоторые конструктивные изменения привели к резкому снижению долговечности лопаток 3-й ступени турбины (ЭИ 598). При этом следует добавить, что на этих агрегатах используются лопатки, отработавшие летный ресурс. Технология ТПУ позволила увеличить долговечность до 50 тыс. ч и более. Интересно заметить и тот факт, что лопатки, отработавшие в составе изделия 10 тысяч часов, испытанные в дальнейшем на стендах, показали более высокий предел выносливости, чем исходные упрочненные ТПУ-прирост составил 15%.

Это явление было детально исследовано с применением современных физических методов. Установлено, что при ТПУ создается специфический поверхностный слой с неподвижными дислокациями, которые и приводят к наблюдаемому эффекту.

В настоящее время на двигателях серии 14СТ устанавливаются лопатки из сплава ЖС6К-ВИ (агитированные, с направленной кристаллизацией). Термоупрочнение в этом случае позволило увеличить предел выносливости на 50...60%

Предварительные исследования показали, что термопластическое упрочнение успешно может быть использовано и для упрочнения первой и второй ступеней лопаток турбины газоперекачивающего агрегата ГТК 10-4, широко используемого на всей территории России и СНГ. Для практической реализации метода была спроектирована и опробована оснастка для ТПУ лопаток 1-й ступени турбины ГТК10-4, включающая в себя камеры для спрерных решеток, спрерные решетки для длиномерных

лопаток, систему крепления замковой части лопаток систему подвода охлаждающей с подвода сжатого воздуха. Была проведена отладка установки по следующим параметрам: стабильно температурного режима, стабильность уровня давления охлаждающей жидкости, стабильность работы компрессорных устройств, стабильность работы системы перемещения лопатки в зоны нагрева и охлаждения.

Для упрочнения лопаток первой ступени турбины ГТК10-4 были подготовлены 5 новых лопаток, полученных с АОЗТ "НЕВЭНЕРГОМАШ" (г. Санкт-Петербург), и 12 отработавших ресурс в составе агрегата ГТК10-4, предоставленных предприятием "Самаратрансгаз" РАО "Газпром".

Все лопатки прошли входной контроль по следующим параметрам:  
внешний вид (наличие забоин, непровары, раковины и т.д.);  
геометрические размеры;  
микротрещины.

По результатам входного контроля все лопатки были признаны годными.

Перед упрочнением все лопатки были термообработаны при температуре  $T=850^{\circ}\text{C}$  в течение 8 ч в среде аргона, охлаждение с печью.

Упрочнение лопаток производилось на специальной установке ТПУ. Крепление лопаток осуществлялось за замковую часть. Одновременно с лопатками упрочнялись контрольные образцы из сплава ЭИ89 (ХН65ВТ10), который применяется для изготовления лопаток. Размер образцов  $100 \times 20 \times 3$ .

На образцах исследовались остаточные напряжения и деформационное упрочнение.

Упрочнение лопаток и контрольных образцов проводилось на предварительно выбранном оптимальном режиме:

температура нагрева лопаток  $700^{\circ}\text{C}$  ;  
выдержка в камере нагрева 20 мин;  
давление в камере спреерного охлаждения Р-5 атм.

На указанном режиме проводилось упрочнение как новых, так и отработавших ресурс лопаток.

После термопластического упрочнения проведены исследования остаточных напряжений деформационного упрочнения.

Результаты исследования:

остаточные напряжения 700 МПа;

деформационное упрочнение 0,5% относительной деформации.

Эти результаты соответствуют оптимальной технологии термопластического упрочнения для данных лопаток.

Для усталостных испытаний были подготовлены 3 серии лопаток:

новые, упрочненные методом ТПУ;

отработавшие ресурс и упрочненные методом ТПУ;

отработавшие ресурс, не подвергнутые дальнейшему упрочнению.

Усталостные испытания проводились на базе АОЗТ "НЕВЭНЕРГОМАШ". Результаты их испытаний приведены в табл.1. Кроме того ранее нами были проведены усталостные испытания лопаток 1-й ступени турбины агрегата ГТК

10-4. на базе Самарского научно-инженерного центра автоматизированных прочностных испытаний и диагностики машин (табл.2-4). Усталостные испытания проводились на электродинамических стендах ВЭДС 400А и Sinken FUJ при симметричном цикле нагружения и комнатной температуре при колебаниях лопаток по основной формуле, главным образом определяющей надежность работы агрегата. База испытаний  $10^7$  циклов нагружения. Динамические напряжения в лопатках замерялись в наиболее нагруженном сечении пера тензометрическим методом. Напряжение лопаток осуществлялось по методу “лестницы”. Вначале устанавливался уровень напряжений ниже ожидаемого предела выносливости и, если лопатка выдерживала базовое число нагружения, уровень напряжения ступенчато через 40 МПа, повышался. При каждом уровне амплитуда колебаний лопатки в процессе испытаний поддерживалась постоянной до набора базы или снижения собственной частоты на 0,5%, что свидетельствовало о появлении очага усталостного разрушения.

В некоторых случаях, при достижении достаточно высоких значений уровня динамических напряжений, усталостные испытания конкретной лопатки прекращались без доводки до разрушения.

Из анализа приведенных данных следует, что рабочие лопатки изготовленные штамповкой из сплава ЭИ-893 по штатной технологии и подвергнутые термопластическому упрочнению, выдержали без разрушений уровни напряжений в 240 и 260 МПа.

Лопатка №1 разрушилась при уровне напряжений в 280 МПа по выходной кромке через  $2,7 \times 10^6$  циклов.

Лопатка № 2 выдержала без разрушений уровни напряжений в 260 и 300 МПа, что свидетельствует о высоком уровне характеристик сопротивления усталости новой лопатки после ТПУ.

Ремонтная лопатка после ТПУ № 4 выдержала без разрушений уровни напряжений в 240 и 280 МПа.

Лопатка №5 из этой же партии прошла без разрушений уровни напряжений в 260 и 300 МПа.

И только ремонтная лопатка после ТПУ № 6 разрушилась через  $1,265 \times 10^6$  циклов при уровне напряжений в 280 МПа. Очаг излома возник на выходной кромке на расстоянии 21 мм от корневого сечения.

Следовательно, ТПУ является довольно эффективным технологическим мероприятием для повышения усталостных свойств турбинных лопаток, имеющих эксплуатационную наработку.

Таблица 1

Результаты усталостных испытаний рабочих лопаток ТВД агрегата ГТК  
10-4 из сплава ЭИ-893

Номер Лоп.	F <sub>0</sub> , Гц	Исполнение	$\sigma$ , МПа	2Авых, мм	N, цикловых	Место излома
1	815	Новая+ТПУ	240	2,55	$10^7$	⇒
	-“-	-----“-----	280	3,00	$2,7 \times 10^6$	Вых.кр.1=26
2	780	Новая+ТПУ	260	2,08	$10^7$	⇒
	-“-	-----“-----	300	2,40	$10^7$	⇒
	-“-	-----“-----	340	2,72	$8,7 \times 10^6$	⇒
3	752	Новая+ТПУ	280	2,85	$8,5 \times 10^6$	⇒
	-“-	-----“-----	320	3,26	$2,2 \times 10^6$	Вых.кр.1=20
4	796	Ремонтная +ТПУ	200	1,93	$10^7$	⇒
	-“-	-----“-----	240	2,31	$10^7$	⇒
	-“-	-----“-----	280	2,70	$10^7$	⇒
5	782	Ремонтная +ТПУ	260	2,40	$10^7$	⇒
	-“-	-----“-----	300	2,76	$9,8 \times 10^6$	⇒
6	810	Ремонтная +ТПУ	280	2,93	$1,27 \times 10^6$	Вых.кр.1=20

Таблица2

Результаты испытаний на усталостную прочность исходных лопаток  
турбины

№ п/п	Номер лопатки	$\sigma$ , МПа	F, Гц	N× $10^6$ , циклов	Место разрушения
1	35	240	895	3,18	Выходная кромка 80мм отоснования хвостовика (по забоине)
2	167	220	815	7,4	Выходная кромка 94мм отоснования хвостовика
3	161	200	932	1,94	Выходная кромка 50мм отоснования хвостовика
4	182	180	913	5,8	Выходная кромка 75мм отоснования хвостовика
5	167(34)	160	896	6,13	Выходная кромка 66мм отоснования

					хвостовика
6	16	140	880	10,0	Не разрушилась
7	75	140	882	10,0	Не разрушилась

Таблица3

Результаты испытаний на усталостную прочность лопаток, восстановленных по ремонтной технологии СМП "Самарагазремонт"

№ п/п	Номер лопатки	$\sigma$ , МПа	F, Гц	$N \times 10^6$ , циклов	Место разрушения
1	76(732)	280	908	1,03	Выходная кромка 53мм основания хвостовика(по забоине)
2	40(830)	260	907	1,9	Выходная кромка 47мм основания хвостовика(по забоине)
3	8(74)	260	893	2,25	Выходная кромка 82мм основания хвостовика(по забоине)
4	110	240	860	5,14	Выходная кромка 60мм основания хвостовика(по забоине)
5	753	240	903	3,46	Выходная кромка 80мм основания хвостовика(по забоине)
6	18	220	911	10,0	Не разрушилась
7	21	220	889	10,0	Не разрушилась

Таблица 4

Результаты испытаний на усталостную прочность лопаток  
восстановленных по ремонтной технологии с применением термопластического  
упрочнения

№ п/п	Номер лопатки	$\sigma$ , МПа	F, Гц	$N \times 10^6$ , циклов	Место разрушения
1	31	280	917	10,0	Не разрушилась
2	86	280	916	10,0	Не разрушилась
3	7(106)	320	828	1,4	Средняя впадина елки хвостовика со стороны корыта

Результаты испытаний позволяют сделать следующие выводы.

1. Термопластическое упрочнение позволяет повысить предел выносливости лопаток 1-й ступени турбины агрегата ГТК 10-4 как отработавших ресурс, так и новых.

2. При испытаниях в условиях обычных температур лопаток, упроченных ТПУ, предел выносливости лопаток, отработавших ресурс повышается со 140 МПа до 260 МПа, или на 85%, а новых лопаток с 180 МПа до 260 МПа, т.е. на 45%.

3. Такие же испытания в условиях комнатных температур новых лопаток, упроченных ультразвуковым методом показали, что предел выносливости повышается со 180 МПа до 240 МПа, т.е. на 33%, а лопаток, отработавших ресурс со 140 МПа до 220 МПа, т.е. на 57%. Эти результаты ниже, чем при Термопластическом упрочении.

4. Предварительные исследования усталостной прочности в условиях рабочих (повышенных) температур, проведенные авторами на лопатках авиационных двигателей, показали, что при этом эффективность метода термопластического упрочнения в сравнении с методами ППД еще выше.

5. Более высокие результаты, характерны для лопаток упроченных термопластическим упрочнением, в сравнении с ультразвуковым с точки зрения повышения долговечности имеет принципиальное значение. Однако более важным является стабильность напряженно-деформированного состояния после ТПУ в процессе эксплуатации (отсутствие релаксации остаточных напряжений), что позволит значительно повысить ресурс работы лопаток и агрегата в целом.

6. На основании проведенных ранее исследований установлено, что использование термопластического упрочнения при восстановлении лопаток турбины, отработавших летней ресурс, позволяет обеспечить не менее 50 тыс. ч. На основании этого можно утверждать, что использование ТПУ при восстановлении лопаток турбины газоперекачивающий агрегатов



,отработавших ресурс, позволит обеспечить повторный срок службы также не менее 50 тыс. ч.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проведение усталостных испытаний рабочих лопаток турбин термопластического упрочнения: Отчет о НИР/ АОЗТ “НЕВЭНЕРГОМАШ”; Руководитель Богорадовский Г.К. Договор № 59/96 – 6,2/39 от 21.05.96г., Санкт-Петербург,1996. 11с. Отв. исполн.: Иванов А.В.,Гурский Г.Л..

2. Усталостные испытания лопаток турбины газоперекачивающего агрегата ГТК 10-4. Отчет о НИР/ Самарский научно- инженерный Центр автоматизированных прочностных испытаний и диагностики машин; Руководитель Еленевский Д.С. Договор №24-НИЦ от 24.04.92 г.,Самара 1996.14с Отв. исполн. Туровцев А.В., Стрилец С.Ю. Самара, 1992 г.