

УДК 621.892

## ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

©2012 Н. Б. Кротинов

Самарский государственный технический университет

Представлен анализ перспектив использования термопластического упрочнения для обработки лопаток авиационных двигателей.

*Газотурбинный авиационный двигатель, лопатки, термопластическое упрочнение, перспективы применения.*

Основным элементом, во многом определяющим ресурс газотурбинного двигателя (ГТД) самолёта, являются лопатки. От их долговечности и надёжности зависят не только межремонтные сроки эксплуатации, но и жизни людей. Они работают в условиях высоких и быстро меняющихся температур, агрессивной газовой среды. В материале лопатки возникают большие напряжения растяжения от центробежных сил и значительные вибрационные напряжения изгиба и кручения от газового потока, амплитуда и частота которых меняются в широких пределах. Быстрая и частая смена температуры приводит к возникновению в лопатках значительных термических напряжений.

Практика эксплуатации двигателей показывает, что преждевременное разрушение лопаток компрессора и турбины обычно носит усталостный характер. Лопатки чаще обрываются по перу, реже – по замку [1].

Разрушение деталей при эксплуатации, как правило, начинается с поверхности вследствие того, что поверхностные слои оказываются наиболее нагруженными при всех видах напряжённого состояния и подвергаются активному воздействию внешней среды. Этому способствуют также облегчённые условия пластического течения металла в поверхностном слое по сравнению с сердцевиной детали (облегчённый выход дислокаций и вакансий на поверхность, меньшая энергия для генерирования дислокаций источниками Франка-Рида) [2].

При циклическом нагружении трещины зарождаются на ранней стадии усталости. Однако зарождение трещины не является разрушением металла и выходом детали из эксплуатации. Долговечность её, в основном, определяется скоростью роста трещины, развитием которой занимает 90-97 % всей долговечности детали.

В процессе нагружения симметричным циклом при наличии остаточных напряжений суммарная эпюра смещается относительно нулевой оси. Сжимающие остаточные напряжения увеличивают сжимающие и уменьшают растягивающие напряжения цикла. Растягивающие – наоборот. Учитывая, что большинство жаропрочных сплавов являются неравнопрочными (предел прочности при сжатии выше, чем при растяжении), то смещение цикла в сторону больших суммарных сжимающих напряжений является особо благоприятным.

С целью обеспечения усталостной прочности и долговечности, лопатки ГТД на финишной стадии производства упрочняются различными способами поверхностного пластического деформирования (ППД), одним из которых является ультразвуковое упрочнение свободными шариками (УЗУ).

Сущность УЗУ заключается в воздействии ультразвуковых колебаний инструмента (волновода) на шарики, которые совершают колебательные движения в зазоре "инструмент – обрабатываемая поверхность детали", получая каждый раз новый импульс кинетической энергии при встрече с

инструментом. При воздействии свободно деформирующихся тел (шариков), движущихся с большой скоростью на поверхностный слой лопатки, происходит его пластическое деформирование (упрочнение).

Основными преимуществами этого способа, по сравнению с другими методами ППД, являются:

- большая скорость рабочего тела – шариков, приводимых в движение ультразвуковым резонатором, что обеспечивает высокую производительность процесса;

- равномерное распределение энергии свободно деформирующихся тел (шариков) по объёму ультразвукового волновода, что даёт равномерное (объёмное) упрочнение поверхности всей лопатки.

Наряду с этими способами существует и термопластическое упрочнение (ТПУ), предложенное профессором Кравченко Б.А. [3].

Механизм формирования напряжений при ТПУ следующий. Деталь прогревается до температуры, не превышающей фазовых и структурных переходов (точка Ас3), а затем подвергается резкому душевому охлаждению. За счёт разности температур поверхности и внутреннего слоя возникают термические напряжения, превышающие предел текучести, и поверхность пластически деформируется в расширенном объёме, тогда как внутренний слой ещё находится в разогретом состоянии и деформациям не подвержен. Далее, постепенно остывая, сжимается внутренний (основной) слой металла, сдавливая при этом поверхность. За счёт различного удельного объёма наружных и внутренних слоёв формируются сжимающие остаточные напряжения.

ТПУ воздействует на поверхность стрессом от резкого перепада температур, схожим с закалкой. Однако, в отличие от закалки, структура и фаза материала не изменяются. Кроме того, напряжения, возникающие при этом, являются не побочным, требующим операции отпуска явлением, а положительным фактором, увеличивающим усталостную прочность.

Термопластическое упрочнение апробировано на лопатках ГТД различных типов и конструкций и обеспечивает значительное преимущество по сравнению с самыми эффективными способами ППД.

Были произведены сравнительные исследования величины остаточных напряжений и циклической прочности лопаток первой ступени турбины ГТК10-4, прошедшие восстановительный ремонт после эксплуатации по нескольким технологическим вариантам [4]:

1 – исходные лопатки (не прошедшие восстановительный ремонт);

2 – лопатки, восстановленные по ремонтной технологии ПТП «Самарагазэнергоремонт», включающей устранение забоин путём их заправки, подварку пластин на торце пера, термообработку (выдержка 5 часов при температуре печи 840...850°C, охлаждение с печью до температуры 500°C, охлаждение на воздухе), полировку и ультразвуковое упрочнение свободными шариками (время обработки  $t_{обр.}=4$  мин, диаметр шариков 1 мм, частота колебаний  $f=20$  кГц, амплитуда колебаний  $\xi=0,012$  мм, масса шариков  $m=0,3$  кг);

3 – лопатки, восстановленные по ремонтной технологии, предложенной исследователями СамГТУ, отличающейся от предыдущей только тем, что использовалось не ультразвуковое, а термопластическое упрочнение (температура нагрева  $T_{нагр.}=750^\circ\text{C}$ , давление охлаждающей жидкости  $P_{охл.}=0,5$  МПа).

В результате получено следующее:

- осевые сжимающие остаточные напряжения после УЗУ и ТПУ оказались приблизительно на одном уровне –  $\sigma_z^{res}=600$  МПа;

- предел выносливости исходных лопаток составил  $\sigma_{-1}=140$  МПа;

- предел выносливости лопаток, восстановленных по технологии ПТП «Самарагазэнергоремонт» с использованием УЗУ, составил  $\sigma_{-1}=220$  МПа;

- предел выносливости лопаток, восстановленных по технологии с использованием ТПУ составил  $\sigma_{-1}=280$  МПа.

Таким образом, прирост предела

выносливости лопаток, восстановленных с использованием УЗУ, по сравнению с не восстановленными составил 57%, а восстановленных с использованием ТПУ – 100%. Прирост предела выносливости лопаток, упрочнённых ТПУ по сравнению с лопатками, упрочнёнными УЗУ, составил 43 %.

Но более важным является не первоначальное значение остаточных напряжений и предела усталостной прочности, а их устойчивость в процессе эксплуатации двигателя: воздействие высоких температур и различного вида нагрузок приводят к ослаблению (релаксации) напряжённо-деформированного поля.

Лопатки, восстановленные с использованием ТПУ, подверглись дальнейшим исследованиям [5]. Полный комплект (90 шт.) был установлен на турбину ГТК 10-4 и запущен в эксплуатацию. Через 12 тыс. часов агрегат останавливался, исследовались величина остаточных напряжений и остаточный предел прочности, лопатки восстанавливались и снова помещались в турбину. При суммарной наработке в 31157 часов остаточные напряжения, сформированные ТПУ, практически полностью релаксировали, однако остаточный предел прочности лопаток составил  $\sigma_{-1}=260$  МПа, то есть снизился с первоначальных  $\sigma_{-1}=280$  МПа приблизительно на 7%. Эти показатели полностью удовлетворили ПТП «Самарагазэнергоремонт», так как минимально допустимое значение согласно ТУ составляет  $\sigma_{-1}=240$  МПа. Экономическая прибыль после внедрения технологии и установки ТПУ лопаток в период с 2000 по 2007 гг. на базе этого предприятия составила 4,2 млн. рублей.

Следует отметить, что вышеприведённые данные были получены в процессе испытаний газотурбинных двигателей, используемых на газоперекачивающих станциях, то есть «на земле». Настороженное отношение к ТПУ, как к методу, достойному применения при производстве лопаток и для авиационных двигателей, вполне понятно. Однако

перспективы для ТПУ и в этой области высоки.

Необходимо обратить внимание на результаты стендовых испытаний лопаток третьей ступени (сплав ЭИ598) и пятой ступени (сплав ЭИ437Б) двигателя НК12-МВ [3]. Модификация МВ используется на ряде самолётов.

На первом этапе исследовались релаксация остаточных напряжений и усталостные характеристики. Лопатки подверглись испытаниям после наработок: 600 ч., 2000 ч. и 200 ч. "Горячих испытаний". "Горячие испытания" - это работа двигателя на повышенном режиме, т.е. при температурах несколько выше тех, которые воздействуют на лопатки турбины при нормальной эксплуатации последних. Режим "горячих испытаний" в течение 200 ч. подобран таким образом, чтобы он соответствовал нормальной работе двигателя в течение 4500 ч.

Исследования остаточных напряжений проводились на образцах, вырезанных электроэрозионным способом из выходных кромок лопаток, которые утонены и в которых чаще всего появляются очаги разрушения.

Лопатки пятой ступени перед установкой на двигатель упрочнялись методом ТПУ на режиме: температура нагрева  $T_{нагр.}=600^{\circ}\text{C}$ ; давление воды  $P_{охл.}=0,5$  МПа. После работы лопаток в составе двигателя в течение 600 ч. максимальная величина остаточных напряжений в поверхностном слое снизилась с 580 МПа до 520 МПа. Большая релаксация наблюдалась при наработке 200 ч. "горячих испытаний" и 2000 ч. В этом случае величина остаточных напряжений на поверхности снизилась до 360 МПа и 380 МПа, соответственно.

Примерно такие же относительные изменения эпюр остаточных напряжений наблюдались и на лопатках третьей ступени, упрочнённых на режимах:  $T_{нагр.}=650^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{охл.}=0,5$  МПа.

Для серийных лопаток установленные пределы выносливости равны: 3-я ступень -  $\sigma_{-1}=260$  МПа, 5-я ступень -  $\sigma_{-1}=220$  МПа. После ТПУ пределы выносливости повысились до значений: 3-я ступень –

$\sigma_{-1}=340$  МПа, 5-я ступень -  $\sigma_{-1}=320$  МПа, то есть повышение составило 30% и 45%, соответственно.

Таким образом, производителям ГТД стоит убедиться в высокой надёжности термопластического упрочнения.

#### Библиографический список

1. Сулима, А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов [Текст] / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев – М.: Машиностроение, 1974. -256 с.
2. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст] / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин – М.: Машиностроение, 1988. - 240 с.
3. Кравченко, Б.А. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надёжности деталей машин:

Монография [Текст] / Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило, Г.Н. Гутман. – Самара: Самарский ГТУ, 2000. – 216 с.

4. Круцило, В.Г. Повышение надёжности и долговечности турбинных лопаток газоперекачивающих агрегатов методом термопластического упрочнения [Текст] / В.Г. Круцило // Актуальные проблемы надёжности технологических, энергетических и транспортных машин: Сбор. трудов междунар. н/т конф. Том 1. – М.: Машиностроение, 2003. – С. 35-38.

5. Круцило В.Г., Кротинов Н.Б. Эксплуатационные испытания турбинных лопаток, упрочнённых термопластическим методом [Текст] / В.Г. Круцило, Н.Б. Кротинов // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2011. № 3. Ч1. С. 380-383.

## THERMOPLASTIC STRENGTHENING OF BLADES AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINES

©2012 N. B. Krotinov

Samara State Technical University

Analysis of prospects for the use of thermoplastic hardening processing blades of aircraft engines set out/

*Aircraft gas turbine engine blade, thermoplastic hardening, the prospectsof.*

#### Информация об авторе

**Кротинов Николай Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры инструментальных систем и сервиса автомобилей, Самарский государственный технический университет. E-mail: ruslogos@gmail.com. Область научных интересов: технология упрочнения деталей газотурбинных двигателей.

**Krotinov Nikolay Borisovich**, associate professor of technical sciences, assistant professor of instrumentation systems and service vehicles department, Samara State Technical University. E-mail: ruslogos@gmail.com. Area of research: turbine engine components hardening technology.