

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 волнового фронта, 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 ППП «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 ППП «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.