

## **ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК, УПРОЧНЁННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

©2011 В. Г. Круцило, Н. Б. Кротинов

Самарский государственный технический университет

Представлена технология восстановления турбинных лопаток, увеличивающая усталостную прочность.

*Газотурбинный двигатель, лопатки, термопластическое упрочнение, технология ремонта.*

Сырьевой сектор является доминирующим в современной экономике России. Углеводородное топливо в виде газа поставляется на внешний и внутренний рынки при помощи газоперекачивающих станций, в состав которых входят газотурбинные двигатели (ГТД).

Наиболее ответственными деталями ГТД являются лопатки первой ступени, подвергающиеся влиянию следующих факторов:

- высокая температура (600...700°C), снижающая прочность и повышающая износ;
- твёрдые частицы, бомбардирующие поверхность, усиливающие эрозию и создающие концентраторы напряжений;
- колебания системы, приводящие к циклическим нагрузкам и развитию усталостных трещин;
- центробежные силы, усиливающие ползучесть и релаксацию.

Всё это приводит к тому, что лопатки имеют весьма ограниченный ресурс, и именно от них зависит межремонтный цикл и надёжность работы всего газоперекачивающего комплекса (ГТК). В этой связи процессу их создания уделяется особое внимание конструкторов и технологов, стремящихся снизить негативное воздействие вышеперечисленных факторов, повысить прочностные свойства: используются прогрессивные материалы и способы получения заготовок, высокоточное металлорежущее оборудование и различные методы упрочняющей обработки. В конечном итоге лопатки имеют высокую себестоимость изготовления и даже небольшое увеличение их ресурса является весьма актуальным и приносит ощутимую пользу.

Разрушение лопаток, как правило, является усталостным и начинает развиваться с

поверхности как наиболее нагруженной и подверженной агрессивному воздействию внешней среды. Поэтому очень эффективной является поверхностная упрочняющая обработка, повышающая циклическую прочность металла.

Базовой технологией изготовления и ремонта лопаток первой ступени турбины ГТК10-4 предусмотрено ультразвуковое упрочнение свободными шариками (УЗУ) как наиболее производительное, способное обрабатывать поверхность сложной формы и обеспечивать формирование сжимающих остаточных напряжений на высоком уровне (500...600 МПа).

Сжимающие остаточные напряжения благоприятным образом влияют на циклическую прочность неравнопрочных деталей, перераспределяя рабочую нагрузку в сторону сжатия. Однако формируются они благодаря пластическим деформациям, воздействию которых на циклическую прочность при высоких температурах неоднозначно: активизируются диффузионные процессы, ускоряющие ползучесть металла, наблюдается коагуляция упрочняющих фаз, усиливающая рекристаллизационные процессы, релаксируют остаточные напряжения. Чем больше степень пластической деформации, тем быстрее протекают эти процессы [2]. Следует отметить, что практически все методы поверхностного пластического деформирования (ППД), к которым относится и УЗУ, характеризуются относительно высокой степенью относительных пластических деформаций, поэтому в условиях работы лопаток обеспечивают невысокие результаты (предел выносливости после эксплуатации  $\sigma_{-1} \leq 240$  МПа).

Теоретически, согласно теореме Генки, для формирования остаточных напряжений на высоком уровне нет необходимости сильно деформировать металл: достаточно относительной деформации  $\delta_{ост}=0,6...1,0\%$ , чтобы получить остаточные напряжения на уровне  $\sigma_{ост}=600...1200$  МПа (для большинства жаропрочных сплавов). Однако достигнуть этого результата традиционными методами ППД пока не представляется возможным.

Альтернативой ППД является метод термопластического упрочнения (ТПУ), предложенный проф. Б.А. Кравченко. Данный способ позволяет формировать остаточные напряжения на уровне  $\sigma_{ост} = 500...600$  МПа при относительной деформации  $\delta_{ост}=0,3...0,5\%$ , что обуславливает высокие показатели релаксационной устойчивости сформированного напряжённо-деформированного состояния в условиях эксплуатации лопаток.

Сущность ТПУ заключается в следующем [1]: деталь прогревается до температуры, не превышающей фазовых и структурных переходов (точка  $A_{с3}$ ), затем подвергается резкому душевому охлаждению. За счет разности температур поверхности и основы возникают термические напряжения, превышающие предел текучести, и поверхность пластически деформируется в расширенном объеме, тогда как внутренний слой еще находится в разогретом состоянии и деформациям не подвержен. Далее, постепенно остывая, сокращается внутренний (основной) слой металла, сжимая при этом и поверхность. За счет различного удельного объема наружных и внутренних слоев формируются сжимающие остаточные напряжения с глубиной залегания  $0,25...0,50$  мм.

С целью определения положительного влияния ТПУ были произведены сравнительные исследования циклической прочности лопаток первой ступени турбины ГТК10-4, прошедшие восстановительный ремонт после эксплуатации по нескольким технологическим вариантам:

- 1) исходные лопатки (не прошедшие восстановительный ремонт);
- 2) лопатки, восстановленные по ремонтной технологии ПТП «Самарагазэнергоремонт», включающей устранение забоин пу-

тём их заправки, подварку пластин на торце пера, термообработку (выдержка 5 часов при температуре печи  $840...850$  С, охлаждение с печью до температуры  $500$  С, затем охлаждение на воздухе), полировку и ультразвуковое упрочнение свободными шариками (время обработки  $\tau_{обр}=4$  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).

Усталостные испытания лопаток проводились в лаборатории Самарского научно-инженерного центра АПИДМ в соответствии с "Едиными техническими условиями на усталостные испытания лопаток газотурбинных установок" НД 631.301.0216-03-98 на электромагнитном вибростенде ЭМВС-1. База  $N=10^7$  циклов, температура  $20^{\circ}\text{C}$ . Количество исследуемых лопаток – по семь штук на каждый вариант. Модуль упругости материала лопаток  $E=204000$  МПа. В результате получено следующее (рис.1):

- предел выносливости исходных лопаток составил  $140$  МПа;
- предел выносливости лопаток, восстановленных по технологии ПТП «Самарагазэнергоремонт» с использованием УЗУ, составил  $220$  МПа;
- предел выносливости лопаток, восстановленных по технологии с использованием ТПУ, составил  $280$  МПа.

Разрушение лопаток происходило по выходной кромке (в основном по забоинам) на расстоянии  $47...94$  мм от основания хвостовика и входной кромке (по забоинам) на расстоянии  $75...80$  мм.

Таким образом, прирост предела выносливости лопаток, восстановленных с использованием УЗУ, по сравнению с невосстановленными составил  $57\%$ , а восстановленных с использованием ТПУ –  $100\%$ .

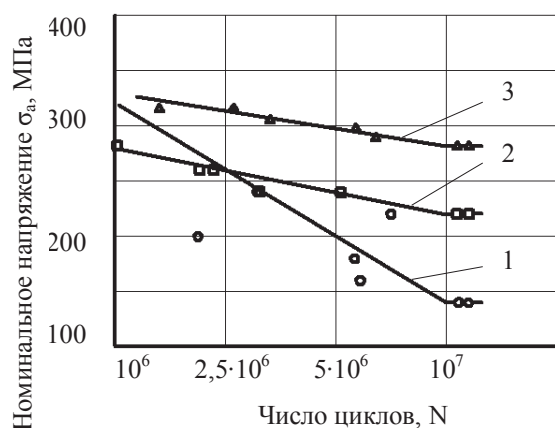


Рис.1. Результаты испытаний лопаток первой ступени (материал ЭИ893) на многоцикловую усталость: 1 – исходные (не восстановленные) лопатки; 2 – лопатки, восстановленные при помощи УЗУ; 3 – лопатки, восстановленные при помощи ТПУ

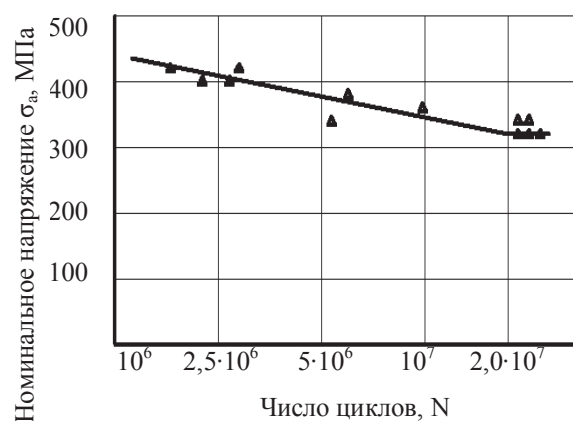


Рис.2. Результаты испытаний на многоцикловую усталость лопаток первой ступени (материал ЭИ893): 12349 ч.н.+ТПУ+12186 ч.н.

Если же сравнивать технологии восстановления между собой, то прирост предела выносливости лопаток, упрочнённых ТПУ, по сравнению с лопатками, упрочнёнными УЗУ, составил 43 %, что говорит о несомненном преимуществе первого.

Согласно результатам исследований руководством ПТП «Самарагазэнергоремонт» было принято решение о замене ультразвукового упрочнения лопаток термопластическим и продолжении испытания лопаток, упрочнённых ТПУ, в реальных условиях эксплуатации.

На турбину высокого давления газоперекачивающего агрегата установили полный комплект лопаток (90 шт.), восстановленных по технологии СамГТУ. Затем через определённый период наработки турбина останавливалась, лопатки диагностировались на наличие дефектов, при необходимости восстанавливались и возвращались в двигатель. Часть лопаток (по 12 штук) направлялась в лабораторию на исследования.

Результаты исследований усталостной прочности представлены на рис. 2 и 3.

Исходя из этих данных, предел выносливости лопаток, упрочнённых ТПУ и прошедших эксплуатационный цикл 12186 часов наработки, не только не снизился, но даже возрос по сравнению с первоначальным (280 МПа и 320 МПа). Объяснить это явление можно следующим образом.

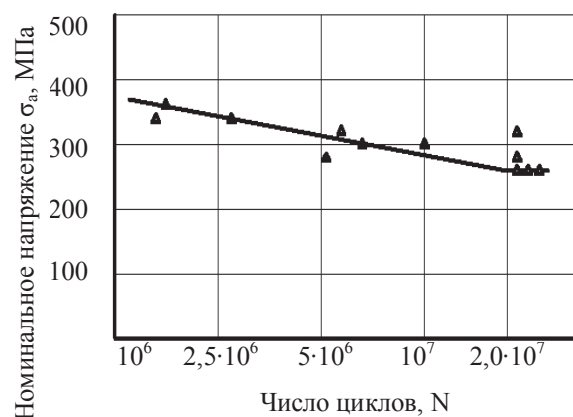


Рис.3. Результаты испытаний на многоцикловую усталость лопаток первой ступени (материал ЭИ893): 12349 ч.н.+ТПУ+12186 ч.н.+ТПУ+6622 ч.н.

Напряжённое поле, сформированное упрочняющей обработкой, создает барьер движению дислокаций к поверхности. Накапливаясь в подповерхностном слое, дислокации блокируют друг друга, препятствуя выходу на поверхность дислокационных нарушений, которые, как правило, являются очагами начальных трещин. Этот механизм поверхностной блокировки содействует повышению циклической прочности даже после того, когда остаточные напряжения релаксируют. Судя по всему, в данном случае имел место именно этот эффект, называемый «эффектом тренировки».

После дальнейшей эксплуатации в 6622 часов часть лопаток снова подверглась испытаниям, в результате которых выяснилось, что предел выносливости лопаток снизился до 260 МПа (рис. 3).

Согласно статистике результатов инспекционных испытаний на усталостную

прочность, начиная с 2001 г., предел выносливости новых лопаток ТВД агрегата ГТК-10-4 со штатным упрочнением, используемым заводом турбинных лопаток, находится в диапазоне 260...340 МПа. Минимально допустимое значение согласно ТУ составляет  $\sigma_{-1}=240$  МПа.

Возвращаясь к нашим результатам, можно сделать вывод о том, что при суммарной наработке лопаток, упрочнённых ТПУ, в 31157 часов усталостная прочность не только не снизилась до предельно допустимого значения, но и находится на уровне новых лопаток со штатным упрочнением.

Таким образом, термопластическое упрочнение доказало своё преимущество в реальных условиях эксплуатации и может быть

рекомендовано как при восстановлении, так и при производстве новых лопаток.

### Библиографический список

1. Пат. 2170272 РФ. Установка для термопластического упрочнения лопаток [Текст] / Б.А. Кравченко, Н.И. Росеев, В.Г. Круцило [и др.] 10.07.2001.

2. Кравченко, Б.А. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин [Текст]: монография / Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило, Г.Н. Гутман. – Самара: Самарский ГТУ, 2000. – 216 с.

## OPERATIONAL TESTING OF THERMOPLASTIC REINFORCED BLADES

©2011 V. G. Krutsilo, N. B. Krotinov

Samara State Technical University

This paper with the technology, what make possible to restore operability of turbine engines blades and increase it fatigue resistance is concerned.

*Gas turbine engine blades, thermoplastic hardening, performance testing, repair technology.*

### Информация об авторах

**Круцило Виталий Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры инструментальных систем и сервиса автомобилей Самарского государственного технического университета. E-mail: [isap@samgtu.ru](mailto:isap@samgtu.ru). Область научных интересов: технология машиностроения.

**Кротинов Николай Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры инструментальных систем и сервиса автомобилей Самарского государственного технического университета. E-mail: [ruslogos@gmail.com](mailto:ruslogos@gmail.com). Область научных интересов: технология упрочнения деталей газотурбинных двигателей.

**Krutsilo Vitaliy Grigorievich**, candidate of technical sciences, assistant professor of instrumentation systems and service vehicles department, Samara State Technical University. E-mail: [isap@samgtu.ru](mailto:isap@samgtu.ru). Area of research: engineering technology.

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