

## **Развитие метода компьютерного моделирования для оценки влияния поверхностной обработки на усталостную прочность**

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины*

На основе специального расчетно-экспериментального метода, основанного на компьютерном моделировании процесса разрушения материалов и элементов конструкций, разработана методика оценки эффективности поверхностно упрочняющей обработки материалов с целью повышения их усталостной прочности. На примере рабочих лопаток первой ступени газотурбинного комплекса проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с литературными данными. Получены диаграммы усталости исходных лопаток и лопаток, упрочненных ультразвуковым методом и методом термопластического упрочнения, а также зависимости предела выносливости от времени эксплуатации исследованных лопаток с учетом релаксации остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение, компьютерное моделирование, релаксация остаточных напряжений, усталостная прочность.

### **Введение**

Известно, что одним из распространенных и эффективных путей повышения усталостной прочности материалов является поверхностная упрочняющая обработка. Благоприятное влияние поверхностного упрочнения обусловлено двумя факторами – повышением сопротивления пластической деформации поверхностного слоя и созданием в нем остаточных напряжений сжатия. Эффект повышения усталостной прочности при поверхностной упрочняющей обработке зависит от типа и исходного состояния материала, вида и режима упрочнения.

Наиболее точную оценку эффективности поверхностной упрочняющей обработки дают усталостные испытания образцов. Поскольку усталостные испытания относятся к числу длительных и дорогостоящих, получение информации путем проведения этих испытаний в полном объеме не всегда возможно, учитывая разнообразие используемых материалов и режимов их поверхностной обработки.

Таким образом, необходимость сокращения материальных и технических затрат требует разработки новых методов прогнозирования свойств материала, в том числе и на основе обобщения экспериментальных данных. В связи с этим большое значение приобретает разработка методов оценки эффективности поверхностного упрочнения и прогнозирования усталостной прочности материалов, в том числе с использованием компьютерного моделирования.

### **1. Постановка задачи**

В настоящей работе рассмотрены результаты применения методов ультразвукового упрочнения (УЗУ) и термопластического упрочнения (ТПУ), которые широко используются для повышения усталостной прочности деталей, работающих в условиях повышенных температур и знакопеременных нагрузок, и позволяют получать благоприятные с точки зрения усталостной прочности остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое материалов. В процессе эксплуатации детали остаточные напряжения, формирующиеся в поверхностном слое в результате упрочняющей обработки, релаксируют, что приводит к уменьшению исходно-

го уровня долговечности. Поэтому особую актуальность приобретает разработка методов прогнозирования срока снижения усталостной прочности в результате релаксации остаточных напряжений до предельно допустимого значения для проведения повторной упрочняющей обработки.

Одним из подходов к оценке эффективности методов поверхностной упрочняющей обработки является использование качественных полуэмпирических моделей, основанных на компьютерном моделировании процесса разрушения поверхностного слоя материалов при циклическом нагружении.

Для оценки влияния методов упрочнения поверхностного слоя на сопротивление усталости была разработана методика, использующая компьютерное моделирование и созданная в рамках специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [1], разработанного в ИПМаш НАН Украины. Ранее было показано [1,2], что компьютерное моделирование, проводимое в рамках РЭМ, может быть использовано для количественной оценки кинетики процесса усталостного разрушения и построения диаграмм усталости различных конструкционных материалов. Как и в традиционной модели прочностной надежности [3], в разработанном методе также используются четыре частные модели: модель материала, модель нагружения, модель формы и модель разрушения. Компьютерная модель материала представляет собой двумерную систему, состоящую из одинаковых по размеру структурных элементов с определенным распределением свойств мезообъемов.

Цель настоящего исследования состояла в дальнейшем развитии РЭМ для разработки методики оценки эффективности поверхностной обработки на характеристики усталости материалов деталей и элементов конструкций, работающих при повышенных температурах. Разработанная методика основана на компьютерном моделировании упрочняющей обработки материала с учётом распределения остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое и их релаксации (т.е. с учетом временного фактора).

В разработанном подходе реализован переход от интегральных механических характеристик материала – предельной деформации и модуля упругости – к функции распределения этих характеристик по структурным элементам, образующим модель материала. В качестве уровня состояния системы используется запас деформативности структурных элементов, исчерпание которого приводит к их последовательному разрушению и, в конечном итоге, к образованию перколяционного кластера разрушения, который определяет переход от дисперсного накопления повреждений к образованию магистральной трещины.

## 2. Результаты компьютерного моделирования

Объектом исследования являлись рабочие лопатки первой ступени газотурбинного комплекса ГТК-10 [4]. Для исследования возможности применения компьютерного моделирования для оценки влияния методов поверхностного упрочнения на циклическую прочность были использованы результаты сравнительных исследований исходных лопаток первой ступени турбины ГТК-10, изготовленных из сплава ЭИ893, и лопаток, восстановленных по ремонтной технологии, использующей УЗУ и ТПУ.

На рис. 1 показано изменение остаточных напряжений сжатия ( $\sigma_{ocm}$ ) с максимумом на поверхности по глубине поверхностного слоя образцов ( $h$ ), вырезанных из нижней части пера лопаток ГТК-10 [4]. Задание в модель разрушения остаточных напряжений сжатия по глубине поверхностного слоя происходило в соот-

ветствии с этой кривой. Размер структурного элемента выбирался равным 25 мкм. Для структурных элементов поверхностного слоя глубиной 300 мкм шаг нагружения корректировался на величину остаточных напряжений.

Из рис. 1 видно, что остаточные напряжения после УЗУ и ТПУ достигают примерно одинакового уровня 560-600 МПа. Однако характер эюр остаточных напряжений по глубине имеет отличия. Если при УЗУ (2) максимум остаточных напряжений располагается на глубине  $h \approx 50$  мкм, то при ТПУ (1) максимум локализуется у поверхности. Нижеприведенные результаты свидетельствуют о том, что расположение максимума остаточных напряжений оказывает существенное значение на характеристики усталости.



Рис. 1. Изменение остаточных напряжений сжатия в зависимости от глубины поверхностного слоя [4]

На рис. 2 проведено сравнение результатов испытаний лопаток на многоцикловую усталость (линии) с результатами компьютерного моделирования (точки): 1 – исходные лопатки, 2 – лопатки, восстановленные при помощи УЗУ, 3 – лопатки, восстановленные при помощи ТПУ. Видно, что зависимости практически совпадают. Предел выносливости исходных лопаток на базе  $10^7$  циклов равняется 140 МПа; предел выносливости лопаток, восстановленных по технологии с использованием ТПУ, – 280 МПа; предел выносливости лопаток, восстановленных по технологии с использованием УЗУ, – 220 МПа.

Детали из жаропрочных сплавов в условиях эксплуатации подвергаются воздействию рабочих температур, а также статических и циклических перегрузок. Как уже отмечалось, это приводит к релаксации остаточных напряжений сжатия, образующихся в поверхностном слое после упрочняющей обработки. Для оценки изменения усталостной долговечности лопаток после УЗУ и ТПУ в процессе их наработки были внесены изменения в компьютерные модели материала и разрушения в соответствии с кривыми релаксации остаточных напряжений (рис. 3, 1 – УЗУ, 2 – ТПУ). Остаточные напряжения, сформированные УЗУ, в процессе эксплуатации релаксируют значительно интенсивнее, по сравнению с остаточными напряжениями, сформированными ТПУ.

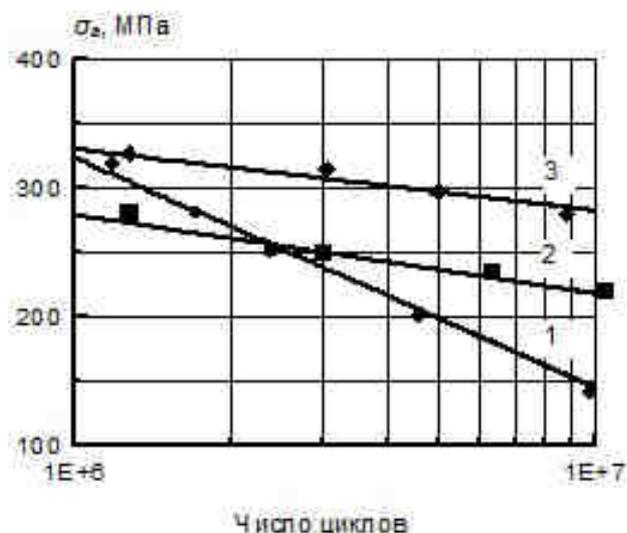


Рис. 2. Диаграммы усталости исследованных лопаток

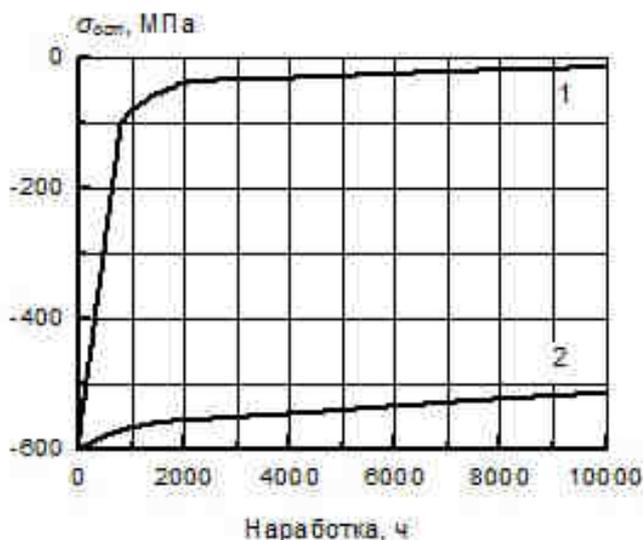


Рис. 3. Изменение остаточных напряжений в исследованных лопатках в процессе наработки [4]

Расчет параметров процесса релаксации остаточных напряжений основывается на методике [5]. Для вычисления релаксирующих остаточных напряжений в качестве исходных данных используются физические свойства материала, кривые ползучести при рабочей температуре и параметры способа и режима упрочнения.

На рис. 4 приведены зависимости усталостной прочности лопаток после УЗУ (1) и ТПУ (2) от наработки с учетом релаксации остаточных напряжений, полученные с помощью компьютерного моделирования.

Из результатов, приведенных на рис. 3, 4, видно, что после 5000 часов наработки остаточные напряжения, образованные в результате ТПУ, релаксировали на 10 %, а снижение предела выносливости составило 40 МПа. В то же время, через 5000 часов эксплуатации снижение предела выносливости лопаток, упрочненных УЗУ, составило 80 МПа. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что метод ТПУ для рассматриваемого случая является более предпочтительным.

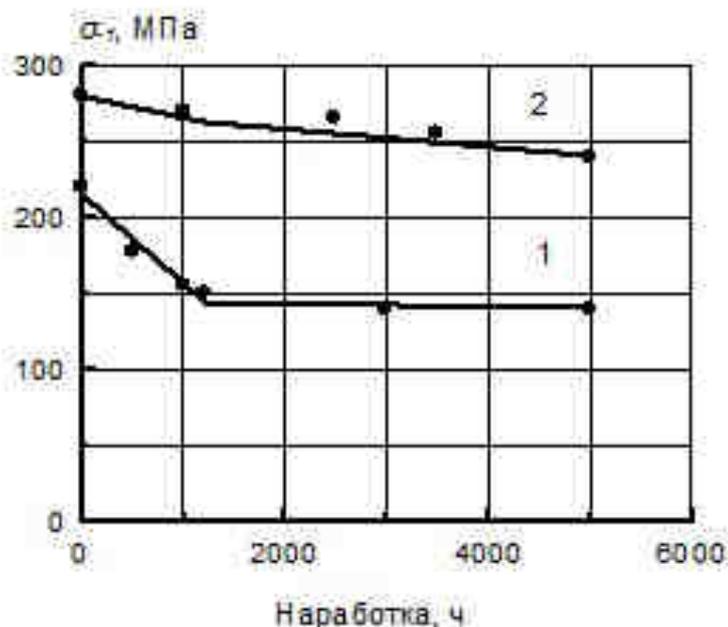


Рис. 4. Изменение предела выносливости в исследованных лопатках в процессе наработки

Сравнение приведенных выше результатов с результатами работы [4] позволяет сделать вывод об адекватности разработанных компьютерных моделей, что подтверждает возможность использования разработанного подхода для оценки влияния упрочняющей обработки материалов на их усталостную прочность.

Разработанная методика позволяет не только определять оптимальный способ поверхностного упрочнения для повышения сопротивления усталости деталей, но и прогнозировать срок снижения усталостной прочности в результате релаксации остаточных напряжений до предельно допустимого значения для проведения повторной упрочняющей обработки. Необходимым условием применения разработанного подхода является наличие зависимости остаточных напряжений сжатия от глубины поверхностного слоя.

### Выводы

На основе специального расчетно-экспериментального метода разработана методика оценки эффективности поверхностной упрочняющей обработки для повышения усталостной прочности материалов, используемых при изготовлении деталей ГТК.

Результаты компьютерного моделирования показали хорошее соответствие с экспериментальными результатами, полученными для лопаток первой ступени ГТК. Показано, что остаточные напряжения сжатия, формируемые в результате ТПУ, характеризуются более высокой релаксационной стойкостью и более высокими значениями усталостной прочности по сравнению с методом УЗУ.

Разработанная методика, наряду с экспериментальными данными, может быть использована для прогнозирования влияния метода поверхностной обработки деталей ГТД на предполагаемый срок службы и определения наступления момента опасной или недопустимой эксплуатации исследуемого оборудования, требующего проведения повторной поверхностной обработки.

### Список литературы

1. Милешкин М.Б. Применение специального расчетно-экспериментального метода для оценки остаточного ресурса элементов конструкций по фактическому состоянию материала / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Надежность и долговечность машин и сооружений. – Киев: ИПП НАН Украины, 2006. – С. 304-310.
2. Милешкин М.Б. Оценка влияния эксплуатационных условий нагружения на долговечность лопаток ГТД / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10/67. – С. 118-122.
3. Биргер И.А. Соппротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. - 560 с.
4. Круцило В.Г. Эксплуатационные испытания турбинных лопаток, упрочненных термопластическим методом / В.Г. Круцило, Н.Б. Кротинов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – №3(27). – С. 380-383.
5. Радченко В.П. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях / В.П. Радченко, М.Н. Саушкин. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с.

Поступила в редакцию 29.08.2017

### Розвиток методу комп'ютерного моделювання для оцінки впливу поверхневої обробки на втомну міцність

На основі спеціального розрахунково-експериментального методу, заснованого на комп'ютерному моделюванні процесу руйнування матеріалів і елементів конструкцій, розроблено методику оцінки ефективності поверхнево зміцнюючої обробки матеріалів з метою підвищення їх втомної міцності. На прикладі робочих лопаток першого ступеня газотурбінного комплексу проведено порівняння результатів комп'ютерного моделювання з літературними даними. Отримано діаграми втоми вихідних лопаток і лопаток, зміцнених ультразвуковим методом і методом термопластичного зміцнення. Отримано залежності межі витривалості досліджених лопаток від часу експлуатації з урахуванням релаксації залишкових напружень.

**Ключові слова:** поверхнєве зміцнення, комп'ютерне моделювання, релаксація залишкових напружень, втомна міцність.

### Development of a computer simulation method for estimating the effect of surface treatment on fatigue strength

A method to evaluate the effectiveness of surface hardening treatment of materials in order to increase their fatigue strength, based on a special design-experimental method using computer simulation of the material and structural elements fracture processes was developed. The results of computer simulation method are compared with the literature data using the example of the first stage gas-turbine complex blades. Fatigue diagrams of the initial blades and of the blades strengthened by the ultrasonic method and thermoplastic hardening method are obtained. Taking into account the relaxation of residual stresses the dependences of the investigated blades fatigue limit on the operating time are obtained.

**Key words:** surface hardening, computer simulation, relaxation of residual stresses, fatigue strength.