

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2010 И.Б. Кравченко, В.Н. Курицин

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 20.03.2010

Приведена технология упрочнения лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), позволяющая увеличивать ресурс работы двигателей в целом.

Ключевые слова: *методы упрочнения, усталостные характеристики, газотурбинный двигатель*

Одним из методов повышения эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей является поверхностное пластическое деформирование (ППД). Однако эффективность ППД снижается с увеличением рабочих температур. В последнее время разработан и внедрен новый метод ППД – упрочнение микрошариками, при котором остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое детали формируются при меньших степенях деформационного упрочнения, что дало возможность упрочнять детали, работающие в диапазоне температур до 750°C.

Влияние температуры и времени выдержки на усталостные характеристики упрочненных деталей из жаропрочных сплавов обуславливается в первую очередь структурным состоянием наклепанного слоя. Любые способы ППД (обкатка роликом или шариком, обдувка дробью, микрошариками и др.) воздействуют на зерна поверхностного слоя упрочняемой детали. Беспорядочно ориентированные кристаллы под воздействием деформации, практически нормальной к поверхности, поворачиваются осями наибольшей прочности вдоль поверхности. Такая ориентировка упрочненных кристаллов (зерен) приводит к возникновению в поверхностном слое напряженного состояния сжатия. С увеличением деформации степень текстурованности возрастает и может достигать 100%, все зерна оказываются одинаково ориентированы. Пластическая деформация приводит металл в структурно неустойчивое состояние. Нагрев содействует к снятию искажений решетки тем интенсивнее, чем больше наклеп и выше температура, возникает так называемый «возврат». Наряду с возвратом (отдыхом) возможен и процесс полигонизации, заключающийся в том, что внутри зерна

дислокации объединяются, создавая ячеистую структуру. При относительно высокой температуре наблюдаются также образование новых зерен, т.е. проявляется процесс рекристаллизации и коагуляции упрочняющих фаз. Все это происходит на фоне диффузионных явлений. Например, хром, который входит в состав всех жаропрочных сплавов, имеет наибольшую диффузионную подвижность. В результате этих процессов наклепанный поверхностный слой с течением времени под воздействием температуры изменяет свои механические свойства настолько, что его качество становится отличным от основного, исходного материала (металла). Одновременно релаксируют сжимающие остаточные напряжения, которые в основном и определяют повышенные служебные характеристики. При этом следует иметь в виду, что с увеличением степени наклепа все отмеченные явления интенсифицируются [3]. При ППД степень наклепа достигает величин 30-60% и даже выше, что соответствует относительным деформациям 10-20% и более.

С точки зрения теории формирования остаточных напряжений нет необходимости деформировать поверхностные слои деталей до столь высоких степеней наклепа (относительных деформаций). Согласно теореме Генки остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в деформированных слоях и фиктивными напряжениями, в предположении, что металл находится в упругом состоянии, т. е. (рис. 1):

$$\sigma_{ост} = \sigma^* - \sigma_y^*$$

На основании построения можно заключить, что для формирования остаточных напряжений равных пределу текучести $\sigma_{0.2}$ достаточно относительной деформации:

Кравченко Ирина Борисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика». E-mail: kравchenko_ib@mail.ru

Курицын Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика». E-mail: kuritsin_vn@mail.ru

$$\delta^* = \frac{\sigma^* + \sigma_{0,2}}{E}$$

Принимая $\sigma^* = \sigma_{0,2}$, получим $\delta^* = 2\sigma_{0,2}/E$.

Для большинства жаропрочных сплавов $\sigma_{0,2} = 600-1200$ МПа; $E = 2 \times 10^5$ МПа. С учетом этих данных относительные деформации, при которых возникают остаточные напряжения на уровне $\sigma_0 = \sigma_{0,2}$, характеризуются величинами в пределах $\delta_0^* = 0,6-1,0\%$, а остаточные деформации составят $\delta_{ост}^* = 0,3-0,5\%$.

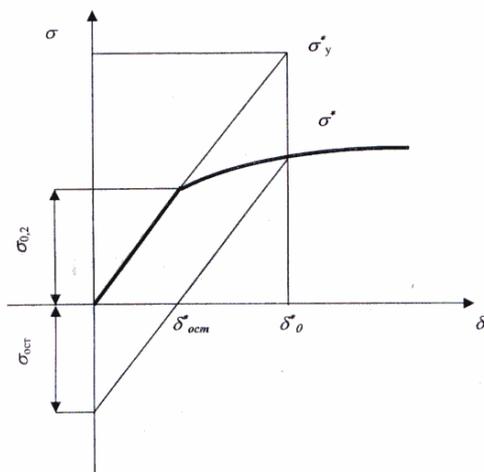


Рис. 1. Схема формирования остаточных напряжений

Если использовать методы ППД для формирования остаточных деформаций, равных $\delta_{ост}^* = 0,3-0,5\%$, то практически упрочнится поверхностный слой толщиной от долей до нескольких микрометров. Вместе с тем для создания эффективного слоя с сжимающими остаточными напряжениями необходимы соответствующие остаточные деформации, проникающие на глубину $\Delta h = 100-250$ мкм [2]. Создать условия, при которых в поверхностном слое детали глубиной $\Delta h = 100-250$ мкм и более остаточные относительные деформации не превышали бы величины $\delta_{ост}^* = 0,5\%$, можно методом термопластического упрочнения (ТПУ). Относительные остаточные деформации на уровне $\delta_{ост}^* = 0,3-0,5\%$ соответствуют степени наклепа $u = 5-8\%$. Следует заметить, что такой уровень наклепа обычными методами, например микротвердометром ПМТ-3, не диагностируется.

Механизм упрочнения при ТПУ можно уяснить на примере весьма простой схемы (рис. 2.) [1]. Пусть некоторая пластина после нагрева до температуры T_H имеет длину l (см. рис.2а). Резко охладим ее поверхность вдоль ширины b . Очевидно, что мгновенно охлажденный слой Δh будет стремиться сократить свою длину на величину $\Delta l = \alpha l (T_H - T_0)$ (см. рис. 2б), где α – коэффициент линейного расширения; T_0 – температура после охлаждения. Это сокращение

невозможно, поскольку слой Δh является единым целым с пластиной.

Мысленно представим себе, что этот слой как бы сократился, а затем его удлиннили и прикрепили к основной массе (см. рис. 2в). Очевидно, что этот процесс приведет к появлению в слое Δh растягивающих напряжений σ_p . В дальнейшем после остывания всей пластины фиктивно можно представить, что слой Δh будет длиннее пластины на величину Δl , если в нем имеют место пластические деформации (см. рис. 2г). Но поскольку неразрывность присутствует, то этот слой будет сжат, и в нем возникнут остаточные напряжения сжатия (см. рис. 2 д). Напряжения σ_p , которые возникнут в результате охлаждения слоя Δh могут быть рассчитаны по зависимости.

$$\sigma_p = \frac{\alpha T_H E}{1 - \mu}$$

где α – термический коэффициент линейного расширения, 1/град; T_H – температура нагрева, °С; E – модуль упругости, МПа; μ – коэффициент Пуассона.

Для упругой области $\mu = 0,3$. Модуль Пуассона введен, так как система относится к плосконапряженному состоянию. Относительная температурная деформация, как известно, равна $\delta^* = \Delta l / l = \alpha T_H$. Как уже отмечалось, для формирования остаточных напряжений на уровне предела текучести необходимо, чтобы, $\sigma_p = 2\sigma_{0,2}$, т.е.:

$$\frac{\alpha T_H E}{1 - \mu} \cong 2\sigma_{0,2}$$

Откуда

$$T_H = \frac{2\sigma_{0,2}(1 - \mu)}{\alpha \cdot E} \cong \frac{1,5\sigma_{0,2}}{\alpha \cdot E}$$

Для жаропрочных сплавов средней прочности примем $\sigma_{0,2} = 850$ МПа, $E = 2 \times 10^5$ МПа; $\alpha = (11-13) \cdot 10^{-6}$ 1/град для диапазона температур до $T = 700^\circ\text{C}$. Подставив эти величины в приведенную зависимость, получим $T_H = 500^\circ\text{C}$.

Значение температуры, при которой возникают термопластические деформации, определено при известных допущениях. Однако реальные температуры, найденные на основании точных решений, примерно такого же уровня, т.е. относительно невелики и ниже тех температур, при которых работают детали, например, лопатки газовых турбин. При этом глубина проникновения термопластических деформаций зависит от масштабного фактора (толщины пластины) и может достигать 150-200 мкм и более [4]. Весьма незначительные деформации, сопутствующие ТПУ, содействуют большой стабильности наведенного напряженно-деформированного состояния.

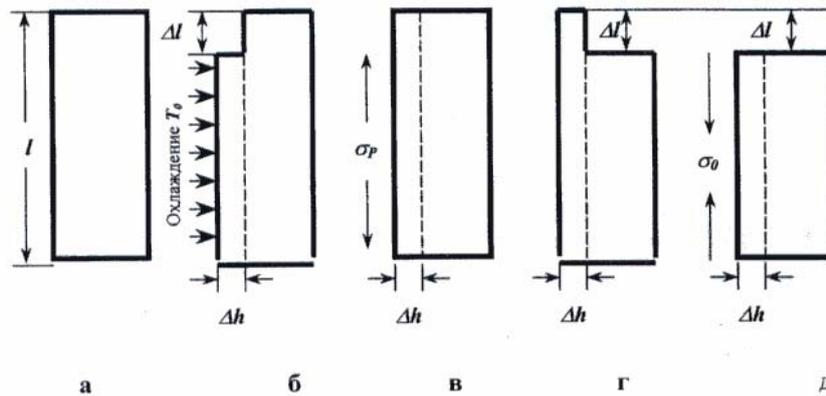


Рис. 2. Схема формирования остаточных напряжений при ТПУ

Перспективным направлением повышения эксплуатационных характеристик деталей ГТД, работающих в условиях высоких температур, является метод термопластического упрочнения, обеспечивающий формирование благоприятного остаточного напряженного состояния в поверхностных слоях детали при минимальных величинах деформационного упрочнения. Одной из актуальных задач производства является изучение технологических возможностей термопластического упрочнения деталей с труднообрабатываемыми областями (например, внутренние полости охлаждаемых лопаток ГТД).

Для повышения жаростойкости лопаток первой ступени газовой турбины двигателя после нанесения четырехкомпонентного покрытия состава Ni, Cr, Al, Y и проведения соответствующих стабилизирующих мероприятий вдоль входной кромки лопатки с помощью электроэрозии прожигается ряд отверстий небольшого диаметра. При эксплуатации через эти отверстия из внутренней полости лопатки воздух поступает на наружные поверхности, охлаждая их. Электроэрозионный процесс, как известно, сопровождается наведением остаточных напряжений растяжения, которые, локализуясь у концентраторов отверстий, оказывают вредное воздействие на прочностные характеристики детали. С целью повышения усталостных характеристик лопатки с отверстиями были подвергнуты термоупрочнению на специальной установке. Установка позволяет проводить упрочнение раздельно внутренней полости лопатки и наружных поверхностей, а также одновременное упрочнение всех поверхностей. В наших исследованиях одновременное упрочнение всех поверхностей проводили на режиме $T_0=700^{\circ}\text{C}$, $P=0,6$ МПа. Внутренняя полость охлаждалась за счет прокачки воды, наружные поверхности – спрейерами. Кроме того, за счет прохода охлаждающей воды из внутренней полости через отверстия последние также упрочнялись [6].

Исходные и упрочненные лопатки испытывались на динамическом стенде по основному тону на базе $N=2 \times 10^7$ циклов. Предварительно лопатки препарировались путем наклейки ряда тензодатчиков. Результаты этих опытов приведены на рис. 3. Как видим, термоупрочнение повысило предел выносливости на 50% с $\sigma_{-1}=80$ МПа до $\sigma_{-1}=120$ МПа. Следует отметить, что в этих исследованиях оптимальный режим термоупрочнения не устанавливался, а проверялась лишь принципиальная возможность повышения предела выносливости.

Замковая часть охлаждаемых лопаток первой ступени турбины двигателя в процессе работы находится при температуре ниже 750°C . При этих температурах ППД микрошариками является эффективным средством повышения циклической прочности как гладких деталей, так и деталей с концентраторами напряжений, типичным представителем которых является хвостовик лопатки.

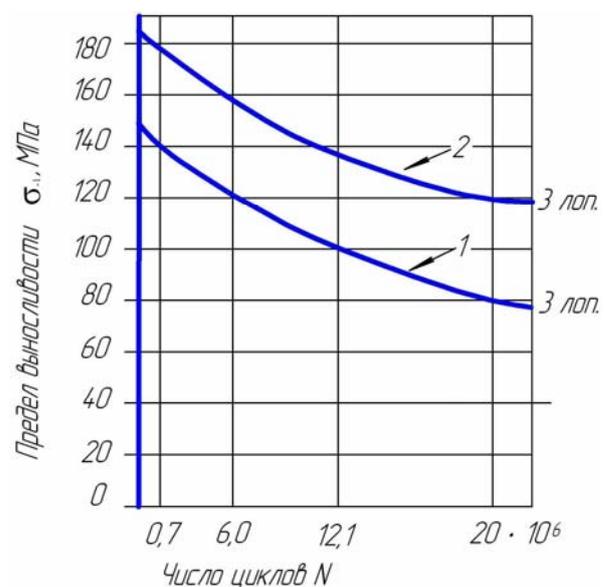


Рис. 3. Влияние ТПУ на выносливость лопаток с технологическими отверстиями:

1 – исходные, 2 – после ТПУ

Нами исследовались лопатки, изготовленные по серийной технологии. Замковая часть их выполнялась в трех вариантах: вариант 1 – замковая часть подвергалась абразивно-жидкостной обработке (АЖО), алитированию и ППД микрошариками (АЖО + Al + ППД микрошариками); вариант 2 – (АЖО + Al); вариант 3 – (Al + ППД микрошариками). Испытания проводились при $T_{исп}^0 = 700^\circ\text{C}$. В качестве критерия образования трещин принималось снижение собственной частоты колебаний лопатки на 20 Гц. Результаты опытов приведены на рис. 4.

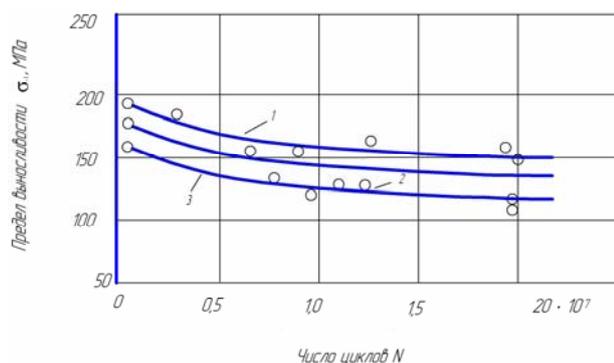


Рис. 4. Кривые выносливости лопаток I ступени двигателя: 1 – ТВО + АЖО + Al + ППД микрошариками; 2 – ТВО + АЖО + Al; 3 – ТВО + Al + ППД микрошариками

Выводы: пластическое поверхностное деформирование микрошариками повышает предел выносливости хвостовиков лопаток. Предлагаемая технология упрочнения лопаток первой ступени турбины двигателя позволяет увеличить ресурс их работы в целом [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кравченко, Б.А. Регулирование напряженного состояния внутренней полости охлаждаемых лопаток / Б.А. Кравченко, Н.Г. Трофимов и др. // Проблемы прочности. – 1980. – №11. – С. 63-67.
2. Курицын, В.Н. Исследование остаточных напряжений на цилиндрических образцах из сплава ЖСБФН после термопластического упрочнения и упрочнения микрошариками / В.Н. Курицын, И.Б. Кравченко // Молодые ученые и специалисты - на рубеже десятой пятилетки: Тез. докл. – Куйбышев, 1980. – С. 54-55.
3. Курицын, В.Н. Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое при дробеударной обработке поверхностным пластическим деформированием микрошариками / В.Н. Курицын, И.Б. Кравченко // Исследование технологических параметров обработки: Сб. тр. – Куйбышев, КПТИ, 1982. – С. 119-123.
4. Кравченко, И.Б. Технологическое обеспечение работоспособности деталей газотурбинных двигателей с концентраторами методами поверхностного упрочнения: Дис. канд. техн. наук., - Куйбышев, 1984, 215 с.
5. Курицын, В.Н. Исследование влияния температурно-временного фактора на релаксацию остаточных напряжений в деталях ГТД из сплава ЖСБФН, обработанных ППД микрошариками // Вестник Самарского государственного технического университета. Выпуск 21. Серия «Технические науки». Научный журнал. – Самара, Сам ГТУ, 2004. – С. 90-92.
6. Кравченко, И.Б. Влияние качества поверхностного слоя на усталостные характеристики деталей // Вестник Самарского государственного технического университета. Выпуск 21. Серия «Технические науки». Научный журнал. – Самара, Сам ГТУ, 2004. – С. 75-79.

MODERN METHODS OF HARDENING AND THEIR INFLUENCE ON FATIGUE CHARACTERISTICS OF DETAILS IN GAS-TURBINE DRIVES

© 2010 I.B. Kravchenko, V.N. Kuritsin

Samara State Technical University

The analysis of modern methods of blades hardening in gas turbine drives is resulted.

Key words: *methods of hardening, fatigue characteristics, gas-turbine drive*

Irina Kravchenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Engineering Graphics". E-mail: kravchenko_ib@mail.ru
Vladimir Kuritsin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Mechanics". E-mail: kuritsin_vn@mail.ru