

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА ЭК79-ИД В УСЛОВИЯХ ТЕРМОСИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

*Д.В. Павленко, В.К. Яценко, А.А. Филоненко, Запорожский национальный технический университет,  
Э.В. Кондратюк, ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, г. Запорожье, Украина*

При работе газотурбинных двигателей рабочие лопатки турбины и последних ступеней высоконапорных компрессоров работают в условиях циклического нагружения и циклически изменяющегося за полетный цикл температурного режима.

Для повышения их характеристик выносливости в производстве широко применяют методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД). В работе [1] было показано, что оптимальной, с точки зрения запаса усталостной прочности лопаток центробежного колеса компрессора, является степень наклепа поверхностного слоя 45...55%. Эффективность упрочнения поверхностным наклепом деталей из жаропрочного сплава на никелевой основе ЭК79-ИД во всем диапазоне рабочих температур сплава показана в работе [2], однако вопрос стабильности эффекта упрочнения при комплексном воздействии на упрочненную деталь механических и термических напряжений остается мало исследованным. Несмотря на то, что вопрос сопротивления усталости жаропрочных сплавов при термосиловом нагружении в настоящее время достаточно широко освещен в литературе [3, 4, и др.], аналогичные исследования в связи с деформационным упрочнением поверхностного слоя практически отсутствуют. В связи с этим исследования влияния наклепа поверхностного слоя на характеристики выносливости образцов при термосиловом нагружении являются весьма актуальными.

Целью настоящего исследования являлась оценка эффективности упрочнения поверхностным наклепом деталей из жаропрочного сплава ЭК79-ИД работающих в условиях термосилового нагружения.

Для определения характеристик выносливости проводили испытания на усталость методом "лестницы" партии образцов (12 - 15 шт.) при консольном изгибе

на электродинамическом вибростенде оснащенном устройством автоматического поддержания амплитуды [5]. Для охлаждения зоны концентратора напряжений образца воздушным потоком вибростенд был дополнительно оборудован компрессором и автоматическим блоком управления режимом термоциклирования. Контроль за температурой в различных сечениях образца осуществляли с помощью приваренных к его поверхности хромель-алюмелевых термопар (рис. 1).

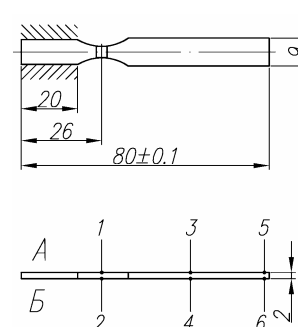


Рис. 1. Эскиз образца для испытаний на усталость и схема расположения термопар

Режим циклирования температуры задавали путем изменения времени нагрева и охлаждения концентратора напряжений образца. Испытания на усталость проводили при "мягком" режиме циклирования температуры ( $200 \leftrightarrow 500^\circ\text{C}$ ). Времена нагрева и охлаждения составляло 120 с.

На усталость испытывали исходные образцы и образцы, упрочненные на ультразвуковой установке стальными шариками диаметром 1,6 мм и имеющими близкую к оптимальной, с точки зрения усталостной прочности, степень поверхностного наклепа 42% [1].

Полученные методом наименьших квадратов уравнения левой ветвей кривых усталости для исходных и упрочненных образцов имеют такой вид:

— для исходных образцов

$$\sigma(N) = 443 - 154 \lg(N), S_{lg(N)} = 0.078$$

— для упрочненных образцов

$$\sigma(N) = 472 - 102 \lg(N), S_{lg(N)} = 0.092$$

Предел выносливости соответственно для исходных и упрочненных образцов составил 277 и 390 МПа. Учитывая, что основную роль в повышении выносливости образцов при ППД играют технологические остаточные напряжения в поверхностном слое, была исследована кинетика их изменения в процессе термосилового нагружения.

Исследования остаточного напряженного состояния поверхностного слоя образцов, не разрушившихся до базы испытаний ( $2 \cdot 10^7$  циклов нагружения), показали (рис. 2), что характер его изменения определяется величиной остаточных напряжений до испытаний.

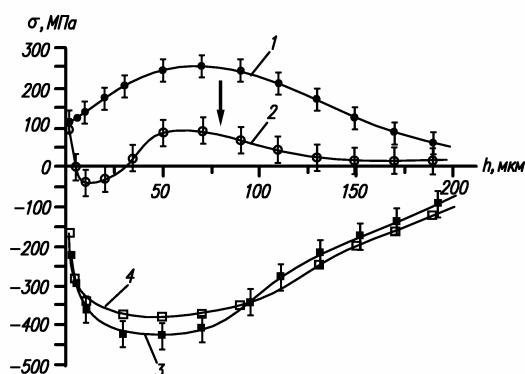


Рис. 2. Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое образцов:

- 1 — исходные, после механической обработки,
- 2 — то же после испытаний,
- 3 — образцы упрочненные на УЗУ ( $S=42\%$ ),
- 4 — то же после испытаний

Для образцов после механической обработки, в поверхностном слое которых распространялись растягивающие остаточные напряжения, наблюдалась их релаксация, которая проходила неоднородно по сечению поверхностного слоя. Величина растягивающих остаточных напряжений на поверхности находилась на том же уровне, что и для образцов до испытаний (100...110 МПа), однако на глубине 20...25 мкм наблюдалось появление сжимающих остаточных напряжений, которые с увеличением глубины переходили в растягивающие. Характер распределения сжимающих остаточных напряжений в упрочненных образцах после их испытаний оставался практически

разцах после их испытаний оставался практически неизменным.

Релаксация растягивающих остаточных напряжений обусловлена их термодинамической неустойчивостью и значительным градиентом температуры от поверхности образца к сердцевине при охлаждении.

В начальный период охлаждения градиент температур по сечению образца достигал значительной величины, в результате чего поверхностные слои оказываются менее нагретыми чем сердцевина. Поверхностный слой упруго деформировался, чему препятствовала более нагретая сердцевина. В результате под поверхностью формировались сжимающие остаточные напряжения. Учитывая, что нагрев образцов осуществляли в печи сопротивления с незначительной скоростью, обратный процесс разупрочнения поверхностного слоя не проявлялся.

Термодинамическая стабильность сжимающих остаточных напряжений и дополнительное упрочнение при циклировании температуры являлись причиной того, что их величина и характер распределения по сечению поверхностного слоя в упрочненных образцах после наработки оставались практически неизменными.

В процессе испытаний на усталость при термосиловом нагружении поверхностный слой образцов подвергался воздействию циклических напряжений от изгиба, циклически изменяющейся температуры и термических напряжений, которые возникали в результате неравномерного прогрева поверхностного слоя и сердцевины образца. В результате комплексного воздействия вышеперечисленных факторов на поверхностный слой в нем могли происходить изменения не только остаточного напряженного состояния, но и характеристик микро-и субструктуры материала, которые, так же, как и остаточные макронапряжения, оказывают влияние на выносливость образцов.

Результаты рентгенодифрактометрического анализа поверхностного слоя образцов показали (табл. 1), что величина микродеформации и размера области когерентного рассеяния (определяющего размер блоков кристаллической мозаики — субзерен) изменяются в процессе циклического нагружения, а их начальное значение

зависит от наличия предварительной упрочняющей обработки. Микродеформация поверхностного слоя, определяющая скалярную плотность дислокаций, при упрочнении увеличивалась от  $1 \cdot 10^4$  отн. ед. до  $9,3 \cdot 10^4$  отн. ед. Одновременно с увеличением величины микродеформации происходило дробление блоков кристаллической мозаики и как следствие увеличение протяженности малоугловых границ. Малоугловые границы, являясь эффективным препятствием для подвижных дислокаций обеспечивали повышение усталостной прочности поверхностного слоя и образцов в целом.

Таблица 1

Результаты рентгенодифрактометрического анализа поверхностного слоя образцов

Состояние образца	Микродеформация $\langle \epsilon \rangle$ , ед	Размер области когерентного рассеяния $D$ , нм
исходные до испытаний	$1 \cdot 10^4$ (эталон)	200 (эталон)
исходные после испытаний	$1,5 \cdot 10^3$	18,5
упрочненные до испытаний	$9,3 \cdot 10^4$	49,2
упрочненные после испытаний	$9,3 \cdot 10^3$	33,7

В процессе испытаний под действием циклических и термических напряжений происходила дополнительная микродеформация зерен и дробление блоков мозаики, т.е. повышение прочностных свойств – тренировка материала. Наибольшее приращение микродеформации и уменьшение размеров блоков мозаики наблюдалось для исходных образцов. Полученная закономерность может быть объяснена тем, что в предварительно деформированном материале процесс генерации новых дислокаций протекает значительно медленнее, чем в исходном, начальная плотность дефектов кристаллической структуры в котором незначительна.

При макро- и микроскопическом исследовании микроструктуры поверхностного слоя образцов не было выявлено признаков, свидетельствующих о протекании в процессе испытаний явных структурных изменений, таких, как появление текстуры, рекристаллизованного слоя, изменения морфологии и количественного состава  $\gamma'$ -фазы и т.п. Микроструктура пред-

ставляла собой равномерное распределение кубоидальных частиц  $\gamma'$ -фазы в матрице сплава.

Исследования влияния наклепа поверхностного слоя образцов из жаропрочного сплава ЭК79-ИД в условиях "мягкого" термосилового нагружения позволили установить, что деформационное упрочнение является эффективным технологическим методом повышения их несущей способности. В процессе нагружения в поверхностном слое упрочненных образцов сохраняется благоприятное остаточное напряженное состояние и субструктура материала.

### Литература

1. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Павленко Д.В. Модель выносливости лопаток центробежного колеса компрессора // Технологические системы.– 2002.– № 5.– С. 52-55.
2. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Павленко Д.В. Выносливость сплава ЭК79-ИД в условиях рабочих температур // Вісник двигунобудування.– 2002.– №1.– С. 37-42.
3. Сопротивление усталости жаропрочных сплавов при комплексном термомеханическом нагружении. / В.Т. Трощенко, Б.А. Грязнов, Л.А. Заслоцкая, Ю.Б. Ямшанов.– К.: Ин-т пробл. прочности АН УССР, 1990.– 48 с.
4. Грязнов Б.А., Городецкий Е.С., Налимов Ю.С. Усталость жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД.– К.: Наук. думка, 1992.– 264 с.
5. Яценко В.К., Павленко Д.В., Филоненко А.А. Метод измерения рассеяния энергии при поперечном колебании призматических образцов. Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: Сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. конф. (г. Севастополе 10-16 сентября 2001 г.): В 3-х Т.– Донецк, ДонГТУ, 2001.– Т. 3.– С. 36-41.

*Поступила в редакцию 17.05.03*

**Рецензенты:** д-р техн. наук, профессор А.Я. Качан, ОАО «Мотор-Сич», г. Запорожье; д-р техн. наук, профессор А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.