

Ю. С. Налимов, Н. Н. Теслюк

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев

МНОГОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ МАТЕРИАЛА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД ДО И ПОСЛЕ РЕМОНТА СВАРКОЙ

Приведена методика экспериментальных исследований на многоцикловую усталость и проанализировано влияние ремонтной технологии на сопротивление усталости жаропрочного сплава ЭК9-ВД.

Ключевые слова: многоцикловая усталость, предел выносливости, образец, технология ремонта сваркой.

В настоящее время все сильнее ощущается необходимость восстановления с помощью различных ремонтных технологий элементов конструкций машин, которые отработали установленный ресурс. Причем, эти технологии должны либо убрать, либо минимизировать влияние таких дефектов, как механическое повреждение, поверхностные коррозионно-эрозионные повреждения, трещины усталости и термоусталости. Эффективность таких технологий можно оценить по результатам испытаний реальных отремонтированных конструкций, их фрагментов или модельных образцов в условиях, которые воспроизводят спектр реальных нагрузок.

В данной работе приведена методика экспериментальных исследований на многоцикловую усталость и проанализировано влияние ремонтной технологии на сопротивление усталости лопаточного сплава.

Для оценки влияния ремонтной технологии свариванием на характеристики сопротивления усталости сплава ЭК9-ВД были изготовлены образцы, заготовки для которых вырезали из нижней части клиновидного образца (рис. 1) электроискровым методом. Такой клиновидный образец используют как имитатор напряженно-деформированного состояния кромки лопатки в условиях неизотермического нагружения.

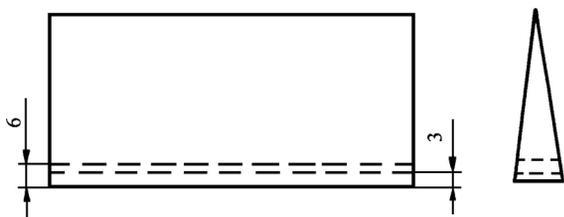


Рис. 1. Схема вырезки заготовок из клиновидного образца

Из этих заготовок электроискровым методом были вырезаны образцы для испытаний на усталость. Образцы были двух видов: гладкие образцы для определения кривой усталости сплава ЭК9-ВД в исходном состоянии (рис. 2, а); образ-

цы с концентратором, который имитирует дефект на поверхности материала (рис. 2, б). Этот дефект подлежал ремонту сваркой по технологии, разработанный Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины для лопаток газотурбинных двигателей из термопрочных материалов.

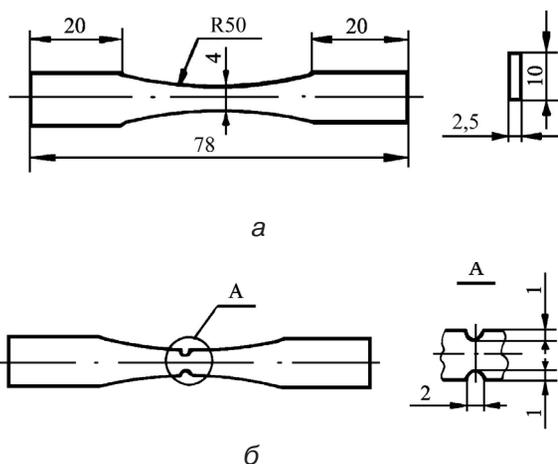


Рис. 2 Образцы для испытаний на усталость: а – гладкий; б – с имитатором эксплуатационного дефекта

Образцы после заваривания дефекта проходили термомеханическую обработку по разработанной технологии ремонта лопаток, после чего их подвергали испытанию на усталость на электродинамическом стенде для определения соответствующих кривых усталости.

Для установления связи между размахом колебаний свободного конца консольно закрепленного образца и напряжением в его опасном сечении проводили динамическую тарировку балки камертона и образца. Подробно методика тарировки и расчет относительной деформации балки камертона представлены в работе [1]. При равных сигналах тензодатчиков на образце и камертоне принимали равенство их деформаций, что позволило установить соответствие напряжения в контрольном сечении образца σ_α (МПа) и размаха колебаний конца образца 2λ (мм).

В процессе испытаний на усталость устанавливали размах колебаний свободного конца консольного образца, который отвечал необходимо-

Таблица 1

Параметры уравнений кривых усталости обработки кривых усталости образцов из сплава ЭК9-ВД (исходные)*

Критерий разрушения	Начало снижения резонансной частоты	Снижение резонансной частоты на 1%
Количество образцов	5	5
$\sigma_a = A + B \lg N_i$	A	727,69
	B	-66,84
$r_{1/1}$	-0,551	-0,894
$S^2(\sigma_a, \lg N)$	37,607	20,18
$\sigma_{-1}^{\text{розн}}$ на базе $2 \cdot 10^7$ цикл., МПа	239,7	245,4
$\sigma_{-1}^{\text{эксн}}$ на базе $2 \cdot 10^7$ цикл., МПа	-	240

* $r_{1/1}$ – коэффициент корреляции; $S^2(\sigma_a, \lg N)$ – средне-неквадратичное отклонение; $\sigma_{-1}^{\text{расч}}$, $\sigma_{-1}^{\text{эксн}}$ – расчетный

и экспериментальный пределы выносливости соответственно

Следует отметить, что особенностью усталостного разрушения исследованного материала является наличие на поверхности рабочей части образца нескольких трещин, которые ориентированы под углом $\sim 45^\circ$ к краям образца (рис. 4).

Группа образцов после ремонтной технологии (5 образцов) была пошлифована, что привело к изменению размера сечения рабочей части об-

му уровню амплитуды напряжения. Размах контролировали с помощью оптического микроскопа МБС-2, количество циклов и частоту нагрузки – электронно-счетными частотомерами ЧЗ-34.

Относительная погрешность установления заданной амплитуды напряжений составляла не больше $\pm 2\%$, что отвечает стандартным требованиям при поддержании уровня нагрузок в циклическом режиме.

Для тензометрования были использованы тензодатчики типа КФ-5 с базой 1 мм и тензоусилитель УТ-4.

Результаты испытаний на многоцикловую усталость и их анализ. Для определения кривой усталости образцов из сплава ЭК9-ВД в исходном состоянии было испытано шесть образцов. Их резонансная частота при первой форме колебаний была ~ 850 - 900 Гц. Предел выносливости образцов определяли на базе $2 \cdot 10^7$ циклов. В процессе испытаний фиксировали число циклов колебаний при начале изменения резонансной частоты и снижении ее на 1%. Первую из них принимали за долговечность, которая отвечает моменту зарождения трещины усталости, после чего длится процесс развития трещины до момента снижения резонансной частоты на 1%. Последнюю долговечность принимали как конечное разрушение образца. При этом на поверхности рабочей части образца наблюдали наличие макротрещин.

Результаты этих испытаний и их статистическая обработка методом наименьших квадратов [2] приведены на рис. 3 и в табл. 1. Отметим, что линию регрессии определяли в виде уравнения

$$\sigma_a = A + B \lg N_i, \quad (1)$$

где σ_a – амплитуда напряжения; A , B – свободный член и коэффициент регрессии соответственно; N_i – количество циклов до разрушения.

Анализ этих кривых свидетельствует, что процесс развития трещин усталости в образцах по количеству циклов в 3-4 раза длиннее (от кривой 1 до кривой 2 на рис. 3), чем до зарождения трещины (начальное падение резонансной частоты, кривая 1, рис. 3).

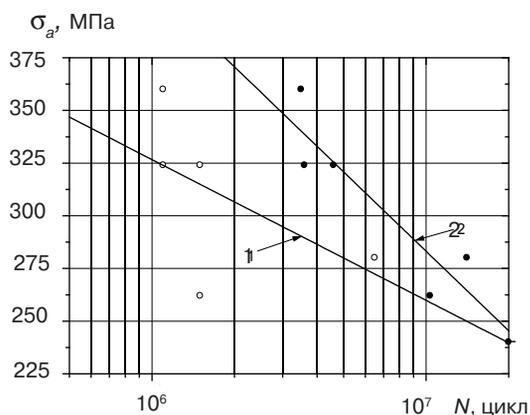
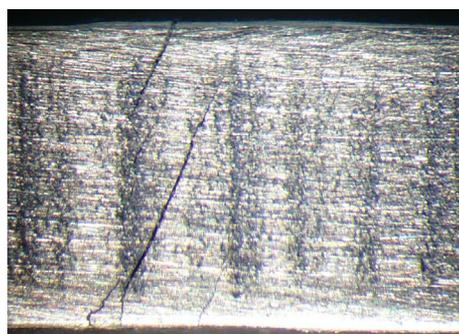


Рис. 3 . Кривые усталости образцов из сплава ЭК9-ВД в исходном состоянии: 1 – по критерию начала снижения резонансной частоты, 2 – по критерию снижения резонансной частоты на 1%



а



б

Рис. 4. Трещины на поверхности образца: а – поверхность по ширине; б – поверхность по толщине

разца. Поэтому эти образцы были также протензометрированы. Резонансная частота образцов при на усталость была равна ~ 720 Гц.

Результаты испытаний на усталость образцов после ремонта сваркой и параметры линии регрессии приведены на рис. 5 и в табл. 2.

Сравнение результатов испытаний на усталость этих двух видов образцов свидетельствует о

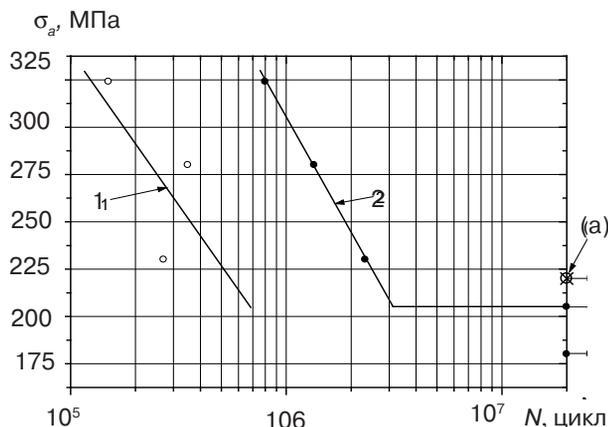


Рис. 5. Кривые усталости образцов из сплава ЭК9–ВД после ремонта сваркой: 1 – по критерию начала снижения резонансной частоты; 2 – по критерию снижения резонансной частота на 1%; (а) – образец, который прошел испытание сначала при $\sigma_a = 205$ МПа ($N = 2 \cdot 10^7$ цикл), а потом при $\sigma_a = 220$ МПа ($N = 2 \cdot 10^7$ цикл)

том, что образцы после ремонтной технологии свариванием имеют характеристики усталости ниже, чем исходные ($\sigma_{-1}^{\text{эксп}} = 240$ МПа – исходные

образцы, $\sigma_{-1}^{\text{эксп}} = 205$ МПа – образцы после ремон-



ЛИТЕРАТУРА

1. Троценко В. Т., Грязнов Б. А., Малашенко И. С. и др. Циклическая прочность рабочих лопаток турбин из литых никелевых сплавов // Пробл. прочности – 2007. – № 2. – С. 5-14.
2. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

НАЛИМОВ Ю. С., ТЕСЛЮК М. М. Багатоциклова втома матеріалу робочих лопаток ГТД до і після ремонту зварюванням.

Наведено методика експериментальних досліджень на багатоциклову втому та проаналізовано вплив ремонтної технології на опір втоми жароміцного сплаву EK9-VD.

Ключові слова: багатоциклова втома, границя витривалості, зразок, технологія ремонту зварюванням.

NALIMOV Yu., Neslyuk N. Highcyclic fatigue of the material for turbine rotor blades of gtebefore and after repair by welding

The technique of experimental investigation on highcyclic fatigue is represented and influence of repair technology on fatigue resistance of heat resisting alloy EK9-VD is analysed.

Keywords: highcyclic fatigue, endurance limit, specimen, technology of repair by welding

Параметры уравнений кривых усталости образцов из сплава ЭК9-ВД после обработки по технологии ремонта лопаток

Критерий разрушения	Начало снижения резонансной частоты	Снижение резонансной частоты на 1%
Количество образцов	3	3
$\sigma_a = A + B \lg N_i$	A	1150,21
	B	-162,00
$r_{1/1}$	-0,6494	-0,9997
$S^2(\sigma_a \lg N)$	50,578	1,641
$\sigma_{-1}^{\text{эксп}}$ на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, МПа	-	205

та). Кроме того, если кривая усталости начальных образцов имеет вид нисходящей прямой к базе $2 \cdot 10^7$ циклов, то кривая усталости отремонтированных образцов имеет более крутой наклон и физический предел выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов с абсциссой излома кривой усталости на уровне около $3 \cdot 10^6$ циклов.

Трещина усталости в образцах после ремонта возникла вне зоны сварного шва, ближе к месту закрепления образца, в зоне термического влияния.

Следует также отметить, что к снижению характеристик усталости образцов после ремонта могло привести то, что после ремонтной технологии свариванием образцы были пошлифованы по всем их поверхностям. Это могло привести к возникновению значительных остаточных напряжений растяжения.