

*М.Р. ОРЛОВ, М.С. ЯКИМОВА, А.Ф. ЛЕТОВ*

## **АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В СОСТАВЕ НАЗЕМНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Эксплуатация наземных газотурбинных установок (ГТУ) с использованием в качестве топлива природного газа сопровождается выявлением ряда эксплуатационных повреждений и разрушений турбинных лопаток, не свойственных для авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), в составе которых применяются унифицированные для ГТД и ГТУ сборочные узлы и детали.

Отсутствие в условиях эксплуатации ГТУ факторов, лимитирующих ресурс авиационных двигателей, таких как цикличность работы двигателя, определяющей развитие малоциклового усталости, работа на взлетном и чрезвычайном режимах, исчерпывающая запас длительной прочности деталей турбины высокого давления (ТВД), дает основание ожидать существенное повышение сроков эксплуатации ГТУ.

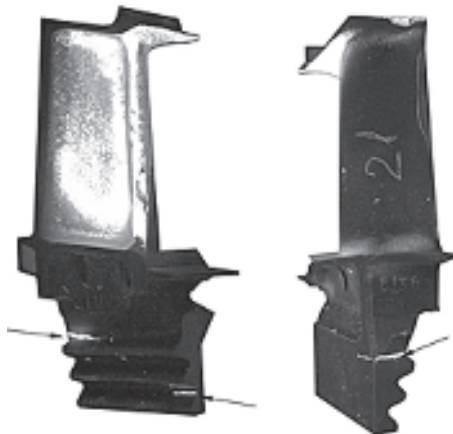
Эксплуатация ГТУ, содержащих в своей конструкции унифицированные детали и узлы, выявила ряд новых дефектов, ограничивающих ресурс. В первую очередь это относится к рабочим лопаткам ТВД из жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической структурой [1, 2]. Работа монокристаллических лопаток ТВД в составе ГТУ приводит к разрушениям хвостовиков лопаток без признаков пластической деформации или усталости, в плоскости, ориентированной перпендикулярно вертикальной оси  $Z$  лопатки, и преимущественно параллельно кристаллографической плоскости (001) кристаллической решетки металлической матрицы жаропрочного никелевого сплава.

### *Результаты исследований*

Внешний вид монокристаллической рабочей лопатки ТВД ГТУ из сплава ЖС26-ВИ с трещинами, выявленными методом капиллярного люминесцентного контроля после эксплуатации в течение 9960 ч, представлен в ультрафиолетовом свете на рис. 1.

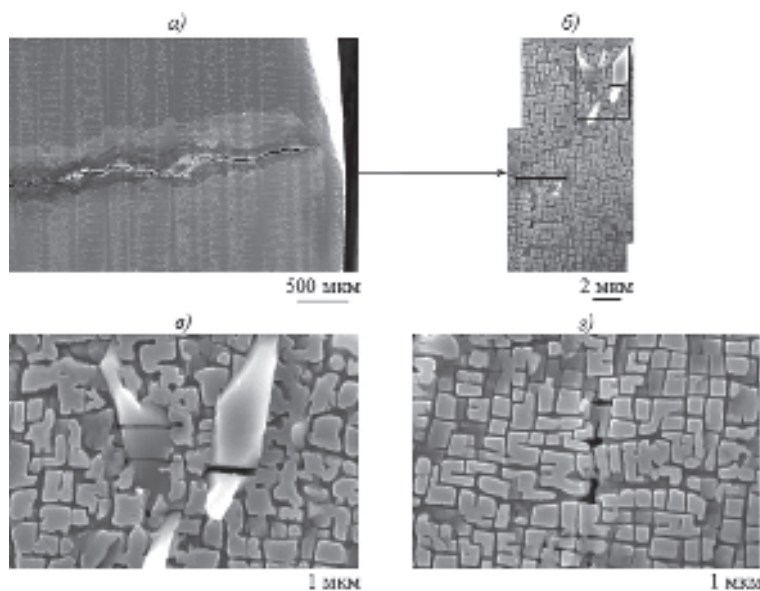
Исследование эксплуатационных трещин и структуры лопатки выполнили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

Шлиф, изготовленный в плоскости базовой поверхности сопряжения разрушенной лопатки с парной лопаткой, позволил установить, что в зоне разрушения хвост-



**Рис. 1.** Рабочая лопатка ТВД ГТУ после наработки в эксплуатации 9960 ч. Свечение трещин в ультрафиолетовом свете при люминесцентном капиллярном контроле

товика лопатка имеет монокристаллическую макроструктуру с ориентировкой кристаллографического направления [001] кристаллической решетки сплава в направлении оси Z лопатки (рис. 2).



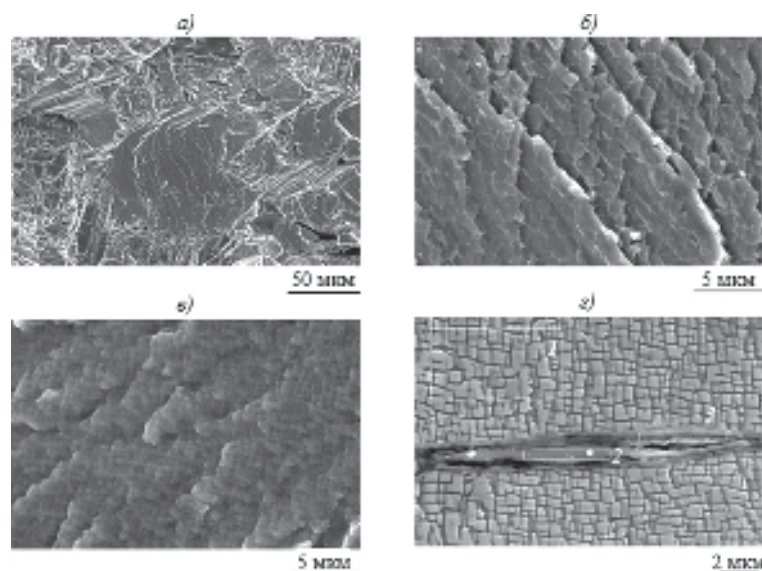
**Рис. 2.** Эксплуатационная трещина в сечении шлифа (*а*,  $\times 35$ ) и структурные признаки ползучести сплава в зоне развития трещины (*б*,  $\times 7500$ ), разрушение карбидов (*в*, зона 1;  $\times 10\,000$ ) и образование диффузионных пор (*г*, зона 2;  $\times 10\,000$ )

Эксплуатационные трещины ориентированы перпендикулярно действующей растягивающей нагрузке и имеют значительное ветвление (см. рис. 2). Поверхность трещин по данным РСМА покрыта тонким слоем оксидов, не содержащих серы.

Фрактографическое исследование вскрытой трещины, расположенной в зоне впадины первого зуба хвостовика, методом РЭМ позволило установить, что поверхность трещины вблизи долома (в вершине трещины) не имеет окисления (рис. 3, *а, б*), что, вероятно, обусловлено незначительным временем взаимодействия металла с окислительной атмосферой в процессе ее роста, а также уровнем рабочих температур, не превышающим  $800^\circ\text{C}$ .

Микрорельеф поверхности трещины представлен террасами хрупких фасеток, на которых видна структура сплава (см. рис. 3, *б*), состоящая из никелевой матрицы и частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы кубической формы. По мере роста эксплуатационной трещины, ее поверхность окислялась без признаков высокотемпературной солевой коррозии (рис. 3, *г*).

Определение механизма эксплуатационного разрушения является основой для принятия решения по выбору корректирующих мероприятий для устранения дефекта (конструктивных, технологических, эксплуатационных). В этой связи необходимо рассматривать все параметры условий эксплуатации лопатки, включая характеристики температурно-силового нагружения материала лопатки и химический состав газового потока.



Состав оксидной пленки (результаты определения методом РСМА)

Зона анализа (см. позицию z)	Содержание элементов, % (по массе)									
	O	Al	Ti	V	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W
1	0	5,99	0,79	0,90	4,63	8,29	60,8	1,73	1,05	15,7
2	24,0	4,29	1,23	0,67	3,17	6,51	42,7	3,17	1,92	11,3
3	25,5	4,23	1,10	0,63	3,19	6,01	46,2	1,69	1,80	9,31

Рис. 3. Поверхность эксплуатационной трещины (*a* –  $\times 500$ ; *б*, *в* –  $\times 5000$ ; *г* –  $\times 6000$ ):

*a*, *б* – морфология поверхности трещины в зоне перед доломом; *в* – окисление поверхности трещины в процессе эксплуатации; *г* – пленка оксидов на поверхности трещины (отмечены зоны анализа состава методом РСМА)

#### Влияние условий температурно-силового нагружения на механизм разрушения сплава ЖС26-ВИ

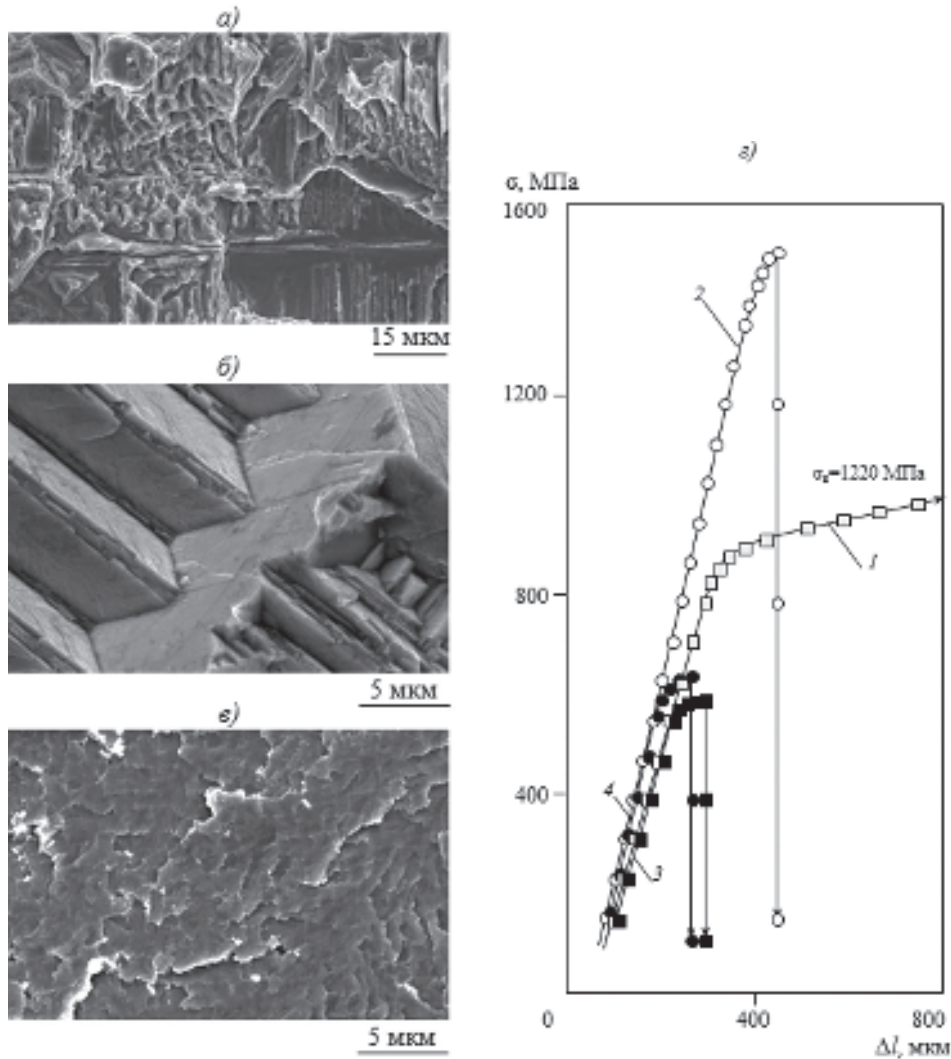
В результате фрактографических исследований установлено, что механизм разрушения лопатки отличается от механизмов статического и усталостного разрушения монокристаллического сплава ЖС26-ВИ при испытаниях образцов на кратковременную прочность и многоцикловую усталость в диапазоне температур от 20 до 800°C (рис. 4).

В условиях статического растяжения монокристаллического сплава ЖС26-ВИ при достижении предела кратковременной прочности происходит хрупкое разрушение карбидов MC шрифтовой морфологии с формированием фасеток, металлическая матрица разрушается по вязкому механизму с формированием дисперсных ямок (см. рис. 4, *a*).

Усталостное разрушение монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов при температуре испытаний до 800°C реализуется по сдвиговому механизму по кристаллографическим плоскостям систем наилегчайшего скольжения  $\{111\}\langle 110 \rangle$ . Сдвиговый механизм в системах наилегчайшего скольжения идентичен для никелевой  $\gamma$ -матрицы и

упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, что предопределяет скольжение дислокаций с вектором Бюргера  $\bar{b} = [\bar{1}10]$  вдоль кристаллографических плоскостей  $\{111\}$  с формированием полос сдвига, пересекающих обе фазы.

В соответствии с этим механизмом микродеформации сплава ЖС26-ВИ в процессе многоциклового усталостного разрушения, поверхность усталостного излома имеет огранку по кристаллографическим плоскостям  $\{111\}$



**Рис. 4.** Различные механизмы разрушения ( $a - \times 2000$ ;  $b, c - \times 5000$ ) монокристаллов жаропрочного сплава ЖС26-ВИ [001] при температуре 20°C:

$a$  – статическое разрушение (диаграммы деформации 1, 2 на позиции  $d$ );  $b$  – многоцикловое усталостное разрушение;  $c$  – замедленное разрушение в среде, содержащей водород (диаграммы деформации 3, 4 на позиции  $d$ ); а также диаграммы деформации ( $d$ ) монокристаллических образцов сплава ЖС26-ВИ с гладкой рабочей частью  $\varnothing 5$  мм (1, 3) и кольцевым концентратором с радиусом у вершины 0,35 мм и диаметром рабочей зоны 5 мм (2, 4)

без выявления элементов микроструктуры в виде упрочняющей  $\gamma'$ -фазы кубической формы (см. рис. 4, б).

Хрупкое разрушение никелевой матрицы монокристаллического жаропрочного сплава с выявлением на фасетках межфазных границ ( $\gamma/\gamma'$ -фаз характерно для замедленного разрушения сплава в условиях водородного охрупчивания [3]. Морфология поверхности эксплуатационного разрушения лопатки была воспроизведена при испытаниях монокристаллических образцов сплава ЖС26-ВИ при растяжении со скоростью нагружения  $10 \text{ Н} \cdot \text{с}^{-1}$  в условиях насыщения поверхности образца водородом (см. рис. 4, в).

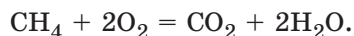
Тонкие структурные исследования сплава ЖС26-ВИ в зоне развития эксплуатационной трещины позволили выявить участие в процессе разрушения лопатки механизма высокотемпературной ползучести. Признаком пластической деформации сплава ЖС26-ВИ по механизму ползучести в зоне хвостовика лопатки является растрескивание карбидов МС (см. рис. 2, в). Особенностью механизма ползучести монокристаллических сплавов при температурах ниже температуры формирования «рафт»-структуры ( $< 900^\circ\text{C}$ ) является образование диффузионной пористости в никелевой  $\gamma$ -матрице (см. рис. 2, з) в соответствии с вакансионной моделью [4].

Образование микротрещин в карбидах и диффузионных пор в никелевой матрице жаропрочного сплава создает условия для участия в процессе разрушения водорода в зонах с высоким уровнем статических растягивающих напряжений (достигающих значений 600 МПа – диаграммы деформации 3 и 4 на рис. 4, з). Источником водорода в условиях работающей на природном газе ГТУ может являться диссоциация паров воды и сероводорода, а также каталитическая конверсия метана на поверхности металла, в том числе и на поверхности растущей трещины.

Возможность образования водорода в условиях окислительной атмосферы газового потока в зоне рабочих лопаток ТВД требует проведения термодинамических расчетов реакций образования водорода в процессе горения природного газа, а также реакций каталитического разложения метана с участием жаропрочного никелевого сплава в составе рабочих лопаток.

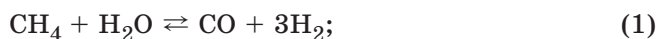
#### *Термодинамическая оценка реакций образования водорода в процессе работы ГТУ*

Горение природного газа, являющегося топливом для ГТУ, сопровождается образованием углекислого газа и паров воды:



Количество образующихся паров воды вдвое превышает количество образующегося углекислого газа.

Появление водорода в процессе работы ГТУ может быть обусловлено протеканием паровой конверсии метана по следующим основным реакциям:





На первой стадии происходит паровая конверсия метана с образованием водорода и монооксида углерода, который вступает далее в реакцию с водяным паром с выделением дополнительного количества водорода.

Известно, что термодинамическая вероятность протекания химической реакции, независимо от того, термическая или каталитическая реакция (поскольку катализатор не влияет на равновесие реакции), определяется знаком и величиной изменения свободной энергии Гиббса ( $\Delta G$ ). Выражения для энергии Гиббса реакций (1) и (2) можно представить в виде:

$$\Delta G(T) = [\Delta G_{\text{CO}_2}(T) + 3\Delta G_{\text{H}_2}(T)] - [\Delta G_{\text{CH}_4}(T) + \Delta G_{\text{H}_2\text{O}}(T)]; \quad (3)$$

$$\Delta G(T) = [\Delta G_{\text{CO}_2}(T) + \Delta G_{\text{H}_2}(T)] - [\Delta G_{\text{CO}}(T) + \Delta G_{\text{H}_2\text{O}}(T)]. \quad (4)$$

Для каждого химического вещества энергию Гиббса при произвольной температуре  $T$  можно вычислить по формуле

$$\Delta G_{\text{вещ}}(T) = \Delta H_{\text{вещ}}^{20^\circ} - T\Delta S_{\text{вещ}}^{20^\circ}, \quad (5)$$

где:  $S$  – энтропия (вычисляется по значениям при  $20^\circ\text{C}$ ),  $H$  – энтальпия:

$$\Delta S_{\text{H}_2\text{O}} = S_{\text{H}_2\text{O}} - 0,5S_{\text{O}_2} - S_{\text{H}_2}; \quad (6)$$

$$\Delta S_{\text{CH}_4} = S_{\text{CH}_4} - S_{\text{C}} - S_{\text{H}_2}; \quad (7)$$

$$\Delta S_{\text{CO}_2} = S_{\text{CO}_2} - S_{\text{C}} - S_{\text{O}_2}; \quad (8)$$

$$\Delta S_{\text{CO}} = S_{\text{CO}} - S_{\text{C}} - 0,5S_{\text{O}_2}; \quad (9)$$

$$\Delta S_{\text{H}_2} = S_{\text{H}_2} + 0,5S_{\text{O}_2} - S_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (10)$$

С учетом формул (5)–(10) и значений термодинамических величин, представленных в таблице, выражения (3) и (4) примут вид:

$$\Delta G(T) = 206,15 - 0,253T \text{ [кДж/ моль]};$$

$$\Delta G(T) = -47,17 + 0,029T \text{ [кДж/ моль]}.$$

Из анализа данных выражений следует, что для реакции (1) величина  $\Delta G$  становится отрицательной при температурах  $>550^\circ\text{C}$ , тогда как в реакции (2) равновесие смещено в сторону образования водорода при температуре  $>300^\circ\text{C}$ . Таким образом, в условиях работы ГТУ возможно образование водорода в газовом потоке путем паровой конверсии метана.

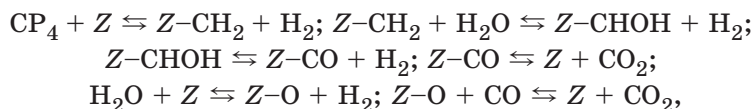
Образование водорода также возможно в результате каталитических процессов превращения метана на поверхности никелевых сплавов. Известно, что никель, нанесенный на различные носители ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и др.), является активным катализатором превращения углеводородов в химической и нефтехимической промышленности [6]. При этом выбор условий проведения процесса (температура, давление, скорость подачи сырья) зависит от технологии дальнейшей переработки получаемых продуктов. Каталитическая паровая конверсия метана в промышленности протекает при температуре  $700\text{--}1000^\circ\text{C}$  и объемной скорости  $\sim 1000 \text{ ч}^{-1}$  вплоть до равновесной конверсии метана (90–98%). Активными катализа-

**Термодинамические характеристики химических веществ [5] при температуре**

Термодинамическая величина	Значения величин химических веществ						
	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C
Энтропия <i>S</i> , Дж/(моль · К)	186,2	188,7	197,5	114,9	213,7	205,0	5,74
Энтальпия $\Delta H$ , кДж/моль	-74,9	-241,8	-110,5	0	-393,5	0	0

торами данного процесса являются металлы VIII группы, составляющие следующий ряд активности: Rh > Ru > Ni > Ir > Pt, Pd > Co > Fe. Железо и кобальт в условиях паровой конверсии метана окисляются и дезактивируются, а благородные металлы дороги, поэтому единственным промышленным катализатором паровой конверсии является никель.

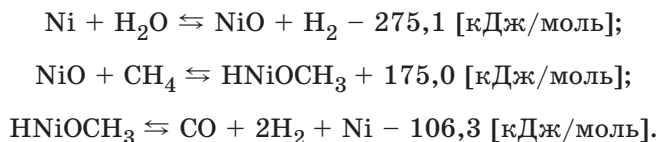
Существует несколько механизмов паровой конверсии метана на никелевых катализаторах. Так, в работе [7] изучили кинетику прямой и обратной реакций паровой конверсии метана и реакции водяного газа на поверхности никеля при 530–700°C и предложили стадийный механизм с образованием промежуточного хемосорбированного радикала СНОН:



где *Z* – активный центр на поверхности катализатора (это может быть атом или группа атомов (ионов) активной каталитической фазы либо различные дефекты кристаллической структуры катализатора).

На первой стадии метан адсорбируется на активном центре никелевого катализатора с образованием адсорбированных метиленовых групп (–СН<sub>2</sub>–), которые далее взаимодействуют с водяным паром с получением хемосорбированного радикала СНОН. Радикал СНОН распадается на водород и адсорбированный монооксид углерода, который далее десорбируется с поверхности катализатора в газовую фазу. Вода диссоциативно адсорбируется на активном центре с образованием водорода и адсорбированного кислорода, который далее окисляет монооксид углерода в газовой фазе до диоксида углерода.

В работе [7] предложен следующий механизм реакции при 700°C:



Скорость процесса контролируется взаимодействием метана с адсорбированным на катализаторе кислородом и тормозится десорбирующимся водородом. Окисление активных центров происходит с образованием промежуточного соединения, обладающего слабыми основными свойствами. Между подвижным водородным атомом метана и промежуточным соеди-

нением  $\text{HNiOCH}_3$  устанавливается водородная связь. Вследствие большого сродства водорода к никелю, протон, принимающий участие в водородной связи, смещается к атому никеля. В результате нейтрализации протона на поверхности кристаллического никеля образовавшийся комплекс атомов разлагается на монооксид углерода, водород и оксид никеля. Распад промежуточного соединения не является лимитирующей стадией, о чем свидетельствует большой экзотермический эффект его образования.

В работе [8] представлены результаты систематических исследований каталитических свойств чистых металлов и некоторых промышленных сплавов и сталей (в том числе, сплава ЭИ435, нержавеющей стали 12X18H10T) в процессе пиролиза углеводородов. Показано, что металлы и сплавы проявляют каталитические свойства в процессе пиролиза углеводородов. В условиях пиролиза *d*-элементы взаимодействуют с реагирующей средой (углеводороды, водяной пар) с образованием равновесных карбидных и оксидных фаз на поверхности катализатора, а также активных форм водорода, возникающих при сорбции (окклюзии) его в металле. Именно образованием активных форм водорода, которые инициируют расщепление углеводородного сырья по радикально-цепному механизму, обусловлены каталитические свойства металлов и сплавов.

Выделение водорода в активной форме в процессе диссоциации паров воды и паровой конверсии метана на поверхности никелевого сплава является постоянным источником водорода, обеспечивающим его диффузию в зону действия упругих растягивающих напряжений по механизму внедрения в кристаллическую решетку  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз. Диффузия водорода в никелевой матрице сопровождается локализацией коллективизированных электронов и охрупчиванием жаропрочного никелевого сплава.

Таким образом, методами РЭМ и РСМА исследовано эксплуатационное разрушение хвостовика монокристаллической рабочей лопатки турбины ГТУ из сплава ЖС26-ВИ. На основании выполненных исследований установлен водородный механизм охрупчивания жаропрочного сплава в процессе замедленного разрушения.

Выполненные термодинамические расчеты подтверждают действие механизмов диссоциации паров воды и паровой конверсии метана на поверхности никелевого сплава с образованием активной формы водорода при рабочих температурах работы ГТУ. Механизм участия водорода в замедленном разрушении хвостовика рабочей лопатки ТВД заключается в его выделении в активной форме на поверхности жаропрочного сплава в местах дефектов кристаллической решетки сплава металлической матрицы, последующей диффузии по механизму внедрения в зоне действия упругих растягивающих напряжений, локализации коллективизированных электронов и разрушению образующихся направленных связей кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз.

Вероятной причиной проявления замедленного разрушения монокристаллического жаропрочного никелевого сплава с участием водородного механизма охрупчивания в условиях длительной эксплуатации наземных ГТУ является вид применяемого топлива – природного газа метана. При использовании природного газа, содержание паров воды в продуктах горения вдвое превышает содержание углекислого газа, а при использовании более тяжелого углеводородного топлива – керосина – концентрация паров воды в продуктах горения уменьшается на порядок.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение. 1977. 336 с.
2. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технология, покрытия. М.: МИСиС. 2001. 632 с.
3. Орлов М.Р., Орлов Е.М. Водородная хрупкость монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 7. С. 36–41.
4. Орлов М.Р. Образование пор в монокристаллических охлаждаемых рабочих лопатках турбины в процессе эксплуатации // ЖФМ. 2007. № 8. С. 306–312.
5. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия. 1991. 432 с.
6. Крылов О.В. Гетерогенный катализ. М.: ИКЦ «Академкнига». 2004. 679 с.
7. Степанов А.В. Получение водорода и водородсодержащих газов. Киев: Наукова думка. 1982. 312 с.
8. Бухаркин А.К. Каталитические свойства металлов и сплавов в процессе пиролиза углеводородов. М.: Техника. 2001. 240 с.

Л.В. ПРОХОДЦЕВА, Е.В. ФИЛОНОВА,  
С.А. НАПРИЕНКО, Н.С. МОИСЕЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ  
РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ СПЛАВА ВТ41\***

На основе литературных данных [1–4] и собственных исследований [5–8] титановых сплавов установлена их повышенная чувствительность к условиям циклического нагружения (форме, асимметрии цикла), что в части работ связывают с явлением ползучести, в других – с кристаллографической текстурой. Так, ранее авторами установлено, что, при испытании образцов из сплавов ВТ9, ВТ3-1, ВТ18У и других по трапецидальному циклу с выдержкой 1 мин при максимальной нагрузке цикла, скорость роста трещины усталости (СРТУ) увеличивалась до 10-ти раз по сравнению с пульсирующим циклом, что связывали с особенностями кристаллографической текстуры. В плоскости разрушения методом рентгеновской дифракции наблюдали преимущественно базисную текстуру с интенсивностью отражения от 2 до 4,5.

В последние годы разработана методика, позволяющая изучать пространственное распределение ориентировок путем анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD-анализ) с использованием растрового электронного микроскопа [9, 10]. В данной работе этот метод использовали для исследования механизма разрушения нового титанового сплава ВТ41 для дисков и «блисков».

Методом вакуумно-дугового переплава выплавлен слиток сплава ВТ41, изотермической штамповкой изготовлены две шайбы в  $(\alpha + \beta)$ -

\* Работа проведена при участии Т.В. Павловой, О.С. Кашапова, М.С. Беляева, Н.А. Колмыковой, И.А. Ходинаева, Н.В. Марчуковой.