

УДК 629.7.036:539.4

Р.П. ПРИДОРОЖНЫЙ, А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ*ГП ЗМКБ “Прогресс” им. А.Г. Ивченко, Украина***ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА
УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН**

В работе с помощью расчетных и экспериментальных методов проведено исследование усталостной прочности монокристаллических рабочих лопаток турбин. Показано влияние аксиальной и азимутальной кристаллографической ориентации на сопротивление усталости лопаток.

монокристаллическая лопатка, предел выносливости, кристаллографическая ориентация, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние, система скольжения, приведенное касательное напряжение, коэффициент пересчета

Введение

Широкое применение монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов требует создания новых и корректировки старых подходов к оценке надежности и ресурса двигателя. В свою очередь, надежность и ресурс двигателя определяется работоспособностью его наиболее нагруженных элементов, одними из которых являются монокристаллические рабочие лопатки турбины. Применение новых методов к оценке надежности и ресурса монокристаллических лопаток турбин позволяет существенно сократить временные и материальные затраты.

Формулирование проблемы

Конструирование лопаток турбин, имеющее целью устранить усталостное разрушение, является более сложным, чем конструирование, ограниченное лишь представлениями о статической прочности, так как оно требует кроме учета концентрации напряжений, учета многих других факторов, влияющих на усталостную прочность, таких как нагружение с нестационарной амплитудой и сочетание статических и динамических нагрузок.

Поскольку экспериментальный анализ усталостной прочности лопаток турбины зачастую требует значительных затрат времени и средств, то для

оценки усталостной прочности лопаток с равноосной структурой было целесообразно основываться на усталостных испытаниях лопаток, при которых можно обнаружить наиболее напряженные зоны и в тоже время оценить роль дополнительных факторов, таких как дефекты изготовления, остаточные напряжения и фреттинг [1]. Однако такой подход, в случае применения монокристаллических лопаток с заданной кристаллографической ориентацией, требует испытания партии лопаток именно заданной ориентации. Тогда как определение предела выносливости лопаток с другой ориентацией вновь требует партии лопаток и т. д. Таким образом, разработка новых методов и подходов по оценке усталостной прочности монокристаллических лопаток, обладающих анизотропией механических и прочностных характеристик, имеет неоспоримое значение.

Методы решения

Усталостные испытания проводятся при резонансных колебаниях по основному тону симметричным циклом нагружения. Современные методы проектирования и расчета позволяют смоделировать различные виды нагружения и достаточно точно определить напряженно-деформированное состояние детали. Моделируя усталостные испытания с по-

мощью трехмерных конечно-элементных моделей лопаток, можно получить распределение динамических напряжений в виде относительных величин. Используя экспериментальные данные, полученные при усталостных испытаниях, и исследования лопаток на вибростенде, можно получить динамические напряжения в любой точке лопатки, используя относительное распределение как масштабный множитель.

Подобно большинству физико-механических характеристик, сопротивление усталости монокристаллов зависит от их кристаллографической ориентации.

Фрактографические исследования поверхностей изломов монокристаллов свидетельствует о том, что распределение трещин при многоциклового усталости происходит по сдвиговому механизму по плоскостям октаэдра $\{111\}$ в направлении $\langle 011 \rangle$, что совпадает с обычной системой скольжения в монокристалле. Поэтому в качестве критерия усталостной прочности монокристалла необходимо использовать критическое напряжение сдвига по плоскости скольжения, приведенное к направлению скольжения, которое по закону Боаса-Шмида является постоянной величиной для сплава и его структурного состояния и не зависит от ориентации монокристалла [2]:

$$\tau_{прив} = \sum_i \sum_j \sigma_{ij} F_{ij}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компонента тензора напряжений; F_{ij} – фактор Шмида, соответствующий данной компоненте тензора напряжений и системе скольжения.

Следовательно, для каждой ориентации будет действовать та система скольжения, для которой окажется максимальным фактор Шмида. Установлено, что скольжение в монокристалле в данном диапазоне температур может осуществляться в 12 октаэдрических системах [3].

Кроме того, в настоящей работе рассмотрена возможность применения в качестве критерия уста-

лостной прочности монокристалла – максимального касательного напряжения:

$$\tau = 0,5 \cdot (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}), \quad (2)$$

где $\sigma_{\max}$ – наибольшее главное напряжение; $\sigma_{\min}$ – наименьшее главное напряжение.

Решение проблемы

В данной работе с помощью метода конечных элементов и трехмерных моделей неохлаждаемой лопатки турбины низкого давления и охлаждаемой лопатки турбины высокого давления показана возможность оценки усталостной прочности по первой изгибной форме колебаний монокристаллической лопатки турбины с заданной кристаллографической ориентацией.

Режим испытания на усталость каждой лопатки задается и контролируется по показаниям основного тензорезистора на спинке прикорневого сечения и пересчитывается на место действия максимальных напряжений, тем самым определяя предел выносливости лопаток. Выполняемые расчеты позволяют определить изменение значения этого коэффициента пересчета в зависимости от кристаллографической ориентации лопатки. Коэффициент пересчета определяется как отношение величины максимального приведенного касательного напряжения в месте действия максимальных напряжений к величине максимального приведенного касательного напряжения на спинке прикорневого сечения в зависимости от кристаллографической ориентации лопатки с точки зрения механизма зарождения трещины в монокристалле. Кроме того, определялся коэффициент пересчета по максимальным касательным напряжениям.

Результаты расчетных исследований и усталостных испытаний неохлаждаемой лопатки показывают, что критическими зонами, с точки зрения усталостной прочности, являются входная кромка и спинка прикорневого сечения при колебаниях лопатки по первой изгибной форме.

На рис. 1 показано изменение коэффициента пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям в зависимости от азимутальной ориентации, когда ось лопатки совпадает с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$. Изменение величины коэффициента пересчета не превышает 7%, что говорит о небольшом влиянии изменения модуля упругости в поперечном направлении на предел выносливости лопатки. На этом же рисунке представлено изменение коэффициента пересчета по максимальным касательным напряжениям.

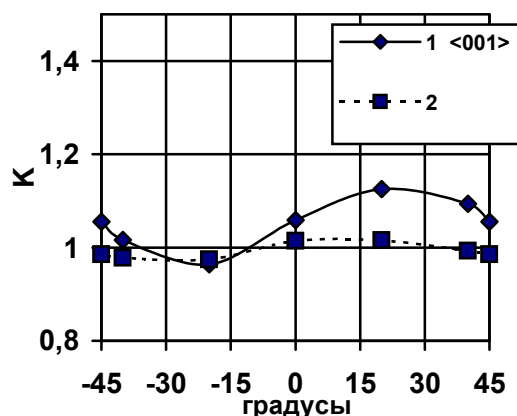


Рис. 1. Изменение величины коэффициента пересчета в зависимости от азимутальной ориентации неохлаждаемой лопатки:

- 1 – коэффициент пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям;
- 2 – коэффициент пересчета по максимальным касательным напряжениям

Расхождение между коэффициентом пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям и коэффициентом пересчета по максимальным касательным напряжениям составляет не более 10%.

На рис. 2 представлено изменение коэффициента пересчета в случае отклонения продольной оси лопатки от направления $\langle 001 \rangle$ к направлениям $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ вдоль границ стереографического треугольника $\langle 001 \rangle$ - $\langle 011 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ - $\langle 111 \rangle$ соответственно. Расчеты показывают, что по мере отклонения от направления $\langle 001 \rangle$ происходит рост величины

коэффициента пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям до 16%, а потом падение на 9 – 24% при отклонении к направлениям $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ соответственно. Расхождение между коэффициентом пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям и коэффициентом пересчета по максимальным касательным напряжениям составляет не более 9 %.

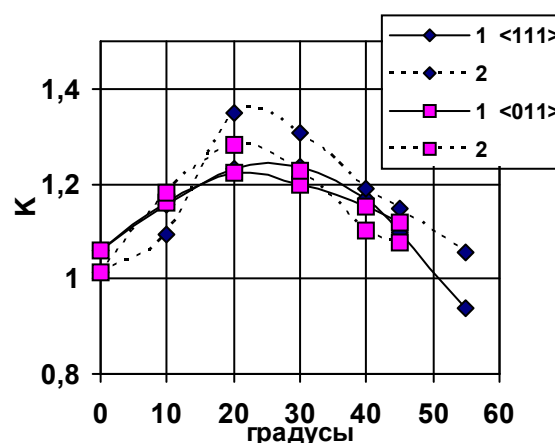


Рис. 2. Изменение величины коэффициента пересчета в зависимости от аксиальной ориентации неохлаждаемой лопатки

Картина изменения коэффициента пересчета по максимальным касательным напряжениям качественно совпадает с картиной изменения коэффициента пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям. Это позволяет использовать коэффициент пересчета по максимальным касательным напряжениям для предварительной оценки усталостной прочности монокристаллической неохлаждаемой лопатки турбины на этапе проектирования.

Из-за сложной формы профиля пера, наличия большого числа дополнительных связей и конструктивных концентраторов напряжений оценка усталостной прочности монокристаллической охлаждаемой лопатки турбины намного сложнее, чем неохлаждаемой. Применение интенсификаторов охлаждения в большинстве случаев приводит к снижению их усталостной прочности.

Усталостные испытания и расчетные исследования показывают, что зоны разрушения охлаждаемой рабочей лопатки турбины могут находиться как на внешнем контуре лопатки, так и на внутренней поверхности стенок лопатки.

На рис. 3 показано изменение коэффициента пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям в зависимости от азимутальной ориентации, когда ось лопатки совпадает с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$.

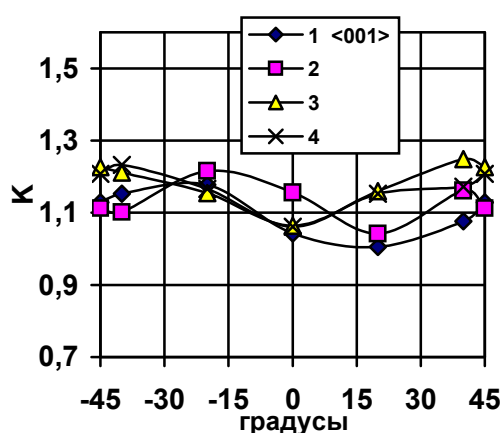


Рис. 3. Изменение величины коэффициента пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям в зависимости от азимутальной ориентации охлаждаемой лопатки:

- 1 – входная кромка прикорневого сечения;
- 2 – ребра во внутреннем канале со стороны входной кромки прикорневого сечения;
- 3 – щелевое отверстие на выходной кромке прикорневого сечения;
- 4 – перегородки между щелевыми отверстиями во внутреннем канале.

Из рисунка видно, что при определенной кристаллографической ориентации вероятность зарождения трещины в той или иной зоне различна. В то же время изменение величины коэффициента пересчета в каждой конкретной зоне не превышает 10%, а в общем случае 4%, что говорит о небольшом влиянии изменения азимутальной ориентации на предел выносливости охлаждаемой лопатки.

На рис. 4, 5 представлено изменение коэффициентов пересчета в случае отклонения продольной оси лопатки от направления $\langle 001 \rangle$ к направлениям

$\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ вдоль границ стереографического треугольника $\langle 001 \rangle$ - $\langle 011 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ - $\langle 111 \rangle$ соответственно. Результаты расчетов демонстрируют существенное влияние аксиальной ориентации на изменение величины коэффициента пересчета (во внутреннем канале со стороны входной кромки изменение достигает 70%), при этом характер изменения в каждой конкретной зоне различен.

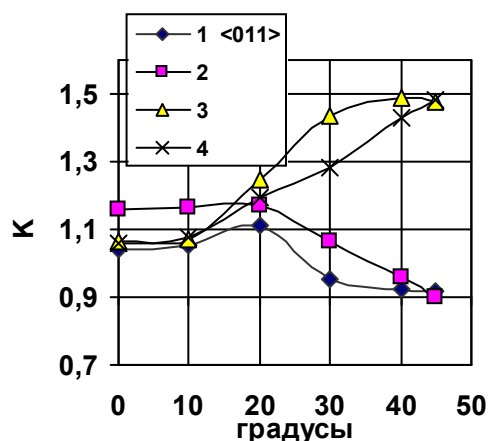


Рис. 4. Изменение величины коэффициента пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям в случае отклонения продольной оси охлаждаемой лопатки от направления $\langle 001 \rangle$ к направлению $\langle 011 \rangle$

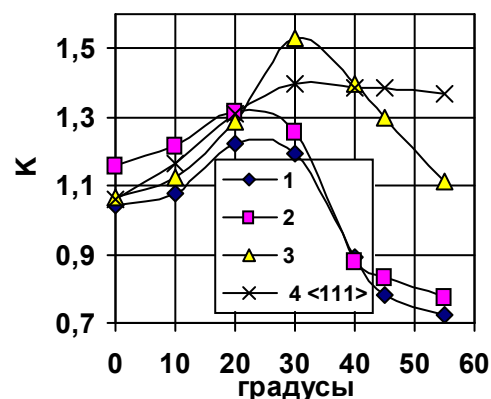


Рис. 5. Изменение величины коэффициента пересчета по максимальным приведенным касательным напряжениям в случае отклонения продольной оси охлаждаемой лопатки от направления $\langle 001 \rangle$ к направлению $\langle 111 \rangle$

Следует отметить, что в отличие от неохлаждаемой лопатки, где независимо от кристаллографи-

ческой ориентации вероятность разрушения по входной кромке выше, чем в остальных зонах лопатки, в охлаждаемой лопатке вероятность разрушения в той или иной зоне лопатки зависит от кристаллографической ориентации.

Распределение коэффициента пересчета по максимальным касательным напряжениям при отклонении продольной оси лопатки от направления $\langle 001 \rangle$ к направлению $\langle 111 \rangle$ показывает отсутствие не только количественного, но и качественного совпадения (рис. 6).

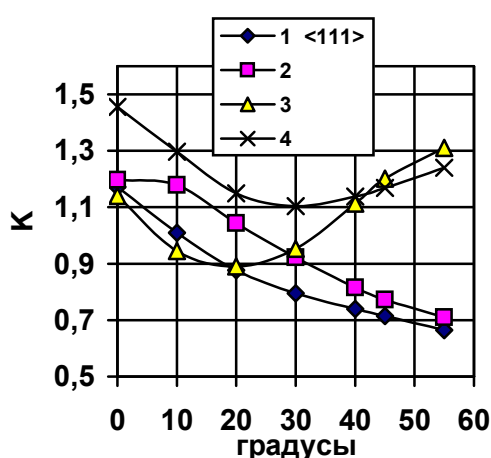


Рис. 6. Изменение величины коэффициента пересчета по максимальным касательным напряжениям в случае отклонения продольной оси лопатки от направления $\langle 001 \rangle$ к направлению $\langle 111 \rangle$

Это говорит о недопустимости использования коэффициента пересчета по максимальным касательным напряжениям для оценки усталостной прочности монокристаллической охлаждаемой лопатки турбины.

Выводы

1. Усталостная прочность монокристаллической лопатки в значительной мере зависит от акси-

альной ориентации лопатки и в меньшей степени от азимутальной.

2. Расчетный метод оценки предела выносливости монокристаллических лопаток позволяет определить вероятные зоны разрушения и изменение величины предела выносливости в зависимости от кристаллографической ориентации.

3. Установлена возможность применения коэффициента пересчета по максимальным касательным напряжениям для предварительной оценки предела выносливости неохлаждаемой лопатки турбины.

4. Применение расчетных методов позволяет значительно уменьшить число испытываемых лопаток при оценке усталостной прочности и позволяет существенно сократить материальные затраты и время испытаний.

Литература

1. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
2. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л. Температурно-временная зависимость анизотропии характеристик длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // Проблемы прочности. – 2002. – №2. – С. 5 – 19.

Поступила в редакцию 29.04.2005

Рецензент: д-р техн. наук, доцент А.В. Олейник, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», Харьков.