

## Термонапряженное состояние клиновидных образцов при наличии трещин термической усталости

Е. А. Задворный

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Представлены результаты расчетов термонапряженного состояния на кромке клиновидного образца при развитии трещин термической усталости при термоусталостных испытаниях.*

Вопросы определения и прогнозирования прочности и долговечности элементов энергетического оборудования, в частности лопаток и дисков газовых турбин [1–4], остаются актуальными и в настоящее время. Однако следует заметить, что основной круг рассматриваемых задач за последнее десятилетие сместился в область определения долговечности элементов конструкций при наличии дефектов типа трещин, что обусловлено активным развитием аналитического аппарата механики разрушения применительно к прикладным задачам прочности. Как показывает анализ дефектов, возникающих в лопатках газотурбинных двигателей (ГТД) в процессе эксплуатации [2, 5], разрушение происходит вследствие развития трещин термической усталости при циклическом воздействии нагрузок и температур. В частности, лопатки направляющего аппарата турбины ГТД, для которых термоусталостные повреждения являются основными, могут эксплуатироваться при наличии трещин определенных размеров, поскольку они характеризуют определенную стадию повреждения материала, но не являются однозначным критерием потери несущей способности конструкции. Однако для рабочих лопаток, подвергающихся комплексному воздействию широкого спектра термических, статических и вибрационных напряжений, трещины представляют значительную опасность как концентраторы напряжений.

Приведенные результаты численного определения термонапряженного состояния клиновидных образцов при наличии трещин термической усталости основаны на данных экспериментальных исследований долговечности лопаток и клиновидных моделей, полученных при изучении кинетики развития трещин термической усталости на газодинамическом стенде [5, 6] в высокотемпературных газовых потоках по режимам, соответствующим или близким к реальным условиям работы лопаток ГТД. При проведении испытаний и последующем расчете моделировался режим запуска–останова двигателя по заданным законам изменения температур потока в полуциклах нагрева и охлаждения [1, 2]. Под клиновидной моделью [6, 7] подразумеваем призму высотой  $h = 80$  мм с поперечным сечением в виде клина с углом закругления кромки  $r$ , углом раствора  $\varphi$  и хордой  $L$ . При этом тип образца обозначается размерами сечения. Например, модель 15.07.20 имеет размеры:  $\varphi = 15^\circ$ ,  $r = 0,7$  мм,  $L = 20$  мм.

Изучение характера возникновения и развития трещин термической усталости на лопатках и клиновидных образцах показало, что начало разрушения наиболее напряженных кромок проявляется в виде сетки мелких трещин глубиной порядка 0,5–1,0 мм, располагающихся перпендикулярно к кромке, фактически по всей длине пера. Дальнейшее циклирование приводит к торможению большинства из них и быстрому увеличению размеров нескольких (как правило, одной–трех) магистральных трещин, расположенных ближе к среднему, наиболее напряженному сечению лопатки [8]. Учитывая это, были проведены расчеты по определению влияния одной и двух магистральных трещин на напряженное состояние кромки клиновидного образца.

Термонапряженно-деформированное состояние (ТНДС) клиновидной модели рассчитывалось по методу конечных элементов с использованием пакета программ «SPACE» [9] для клиновидных моделей, изготовленных из материала ЭИ826 (рис. 1), при граничных условиях третьего рода (рис. 2) в трехмерной постановке с учетом зависимости свойств материала от температуры в цикле  $10 \leftrightarrow 60$  с при  $T_{\max} = 1255^\circ\text{C}$  и  $T_{\min} = 190^\circ\text{C}$ . Граничные условия третьего рода определялись пересчетом из граничных условий первого рода, определяемых в результате термометрирования в ходе испытаний, при решении прямой и обратной задач теплопроводности. На рис. 2 показаны кривые изменения коэффициента теплообмена по поверхности образца для переходных (1 – нагрев, 2 – охлаждение) и стационарного (3) режимов. С целью определения влияния возникающих трещин на напряженное состояние кромки образца расчет проводился для бездефектного образца, образца с одной трещиной в срединной плоскости, двумя трещинами, одна из которых развивалась в срединной плоскости, а вторая – на высоте 20 и 12 мм в разных моделях. Длина трещин выбиралась равной 5 мм. В процессе термоциклирования трещина открывается лишь в полцикле охлаждения, когда на кромке модели действуют растягивающие напряжения. Трещина представляет собой математический разрез с сингулярной точкой в вершине.

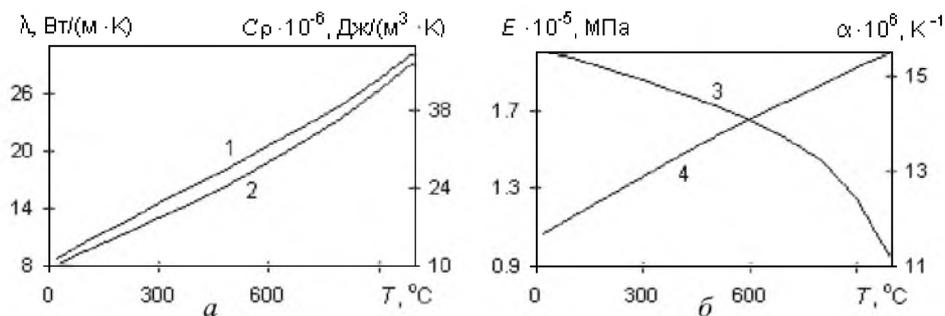


Рис. 1. Зависимость физических  $\lambda$  (1),  $C_p$  (2) – а и механических  $E$  (3),  $\alpha$  (4) – б характеристик сплава ЭИ826 от температуры.

Результаты расчета клиновидной модели 15.07.20 приведены на рис. 3–5. Как видно, для выбранной в работе высоты модели сечения от срединной плоскости до высоты 20 мм находятся в условиях плоского

деформированного состояния материала. При возникновении трещин на кромке клина происходит перераспределение напряжений по высоте кромки, что сказывается на скорости роста трещин. Так, разделение кромки магистральными трещинами на участки сравнительно малой высоты приводит к переходу материала из состояния плоской деформации к плоскому напряженному состоянию с соответствующим уменьшением нормальной компоненты термических напряжений. Возникновение двух магистральных трещин, одна из которых находится в срединном сечении, а вторая – на высоте 12 мм от него, приводит к снижению нормальных напряжений на кромке образца с 154 до 86 МПа (рис. 3, 4). При таких уровнях термических напряжений вероятность появления новых трещин термической усталости на кромке образца существенно уменьшается. Возникновение новых трещин возможно на значительно больших базах испытаний. При этом продолжают развиваться одна–три магистральных трещины, что подтверждается результатами экспериментов. Анализируя термический цикл в целом, следует заметить смещение асимметрии цикла в область сжимающих напряжений (рис. 3). На рис. 5 для сравнения приведено изменение коэффициента интенсивности напряжений (КИН)  $K$  в зависимости от длины трещины  $a$  для трех типоразмеров клина, отличающихся длиной хорды  $l$ . Видно, что с увеличением длины хорды происходит рост КИН с одновременным смещением максимальных значений в область более массивной части образца.

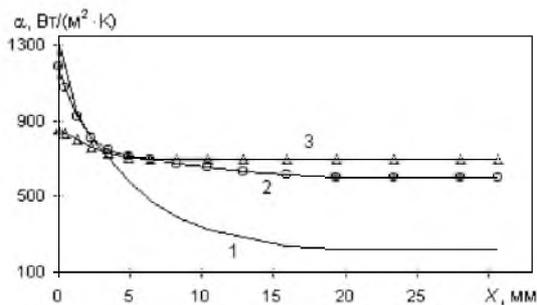


Рис. 2. Изменение коэффициентов теплообмена на поверхности клиновидного образца для различных моментов времени: 1 –  $t = 1...2$  с; 2 –  $t = 12...14$  с; 3 – остальные секунды цикла.

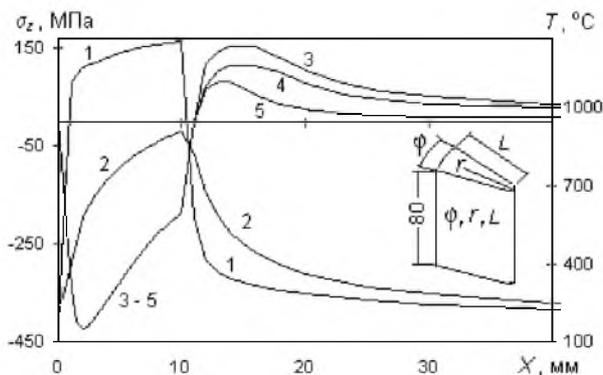


Рис. 3. Изменение температуры потока (1), температуры (2) и напряжений на кромке клиновидной модели в цикле для бездефектного образца (3), а также для образцов с центральной трещиной (4) и с двумя трещинами (центральной и на высоте 20 мм) в области кромки (5).

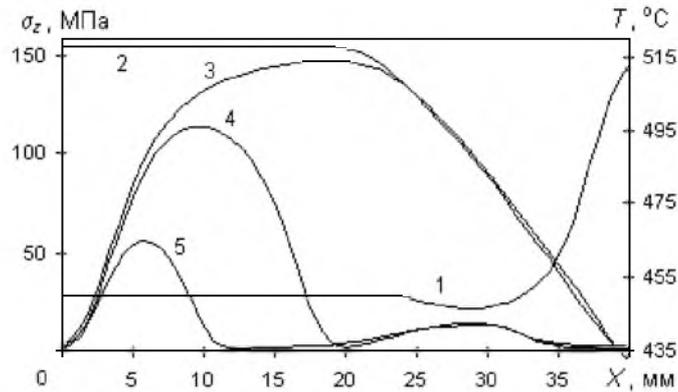


Рис. 4. Изменение температуры (1) и напряжений  $\sigma_z$  на кромке клиновидной модели на 16-й с цикла на бездефектном образце (2), в случае центральной трещины (3), а также в случае двух трещин, расположенных на высоте 20 (4) и 12 (5) мм.

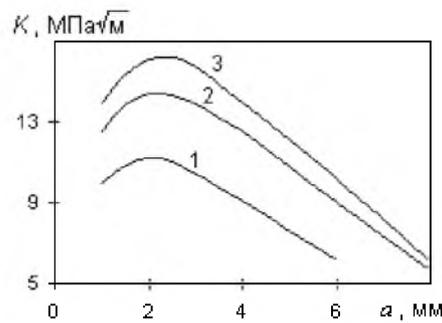


Рис. 5. Изменение КИН  $K$  в зависимости от длины трещины  $a$  в клиновидных образцах: 1, 2, 3 – соответственно модель 15.07.20; 15.07.25 и 15.07.32.

Приведенные результаты свидетельствуют о необходимости учета изменения ТНДС при изучении кинетики трещин на моделях или лопатках и, в частности, при оценке живучести сопловых лопаток в реальных эксплуатационных условиях.

## Резюме

Наведено результати розрахунків термонапруженого стану на кромці клиновидного зразка при розвитку тріщин термічної втоми при термовтомних випробуваннях.

1. Третьяченко Г. Н., Кравчук Л. В., Курият Р. И. и др. Несущая способность лопаток газовых турбин при нестационарном тепловом и силовом воздействии. – Киев: Наук. думка, 1975. – 296 с.
2. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 592 с.
3. Coney M. H. Thermal fatigue cycling in turbine blades // High Temp. Techn. – 1990. – 8, N 2. – P. 115 – 120.

4. *Tao C. H., Xi N. S., Xie M. L., et al.* Analysis of turbine blade breakages in an engine starting motor // *Eng. Failure Anal.* – 1999. – N 6. – P. 245 – 251.
5. *Третьяченко Г. Н., Кравчук Л. В., Куриат Р. И. и др.* Термическая усталость материалов при неоднородном тепловом и термонапряженном состояниях. – Киев: Наук. думка, 1985. – 280 с.
6. *ГОСТ Украины.* Метод испытаний на высокотемпературную коррозию и термоусталость в потоке продуктов горения топлива. ДСТУ 23.6794, 25.02.94. – 27 с.
7. *Кравчук Л. В.* Перспективы использования клиновидной модели для исследования термоциклической долговечности турбинных лопаток // *Пробл. прочности.* – 1978. – № 8. – С. 82 – 87.
8. *Kravchuk L. V., Zadvorny E. A.* Investigation of thermal fatigue crack propagation kinetics in heat-resistant materials under conditions of unsteady heat exchange using the methods of experimental and numerical simulation // *Thermal Stresses '99*, June 13–17, 1999. – Cracow, Poland. – P. 237 – 240.
9. *Кобельский С. В., Куриат Р. И., Кравченко В. И., Квитка А. Л.* Исследование термонапряженного состояния клиновидных моделей лопаток турбин с теплозащитными покрытиями при термоциклическом нагружении // *Пробл. прочности.* – 1999. – № 6. – С. 62 – 70.

Поступила 26. 11. 99