

УДК 629.735.015.4.03:620.178.(045)

Н.С. КУЛИК, С.С. ДУБРОВСКИЙ, Н.А. КОВЕШНИКОВ

Аэрокосмический институт, Национальный авиационный университет, Украина

СПОСОБЫ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ПРОЧНОСТЬ

Рассмотрены способы термомеханического нагружения образцов при испытаниях на прочность в экспериментальной установке. Обосновывается эффективность предлагаемых способов нагружения образцов при испытаниях жаропрочных материалов на термоциклическую долговечность.

нагружение, термоциклическая долговечность, образец, деформация, напряжения, защемление

Введение

В свете современных требований к работе машин и механизмов задача успешного предсказания долговечности их деталей приобретает особое значение. Однако сложность и многообразие процессов, протекающих в металлах при их усталостном разрушении [1 – 5], затрудняют выяснение общих закономерностей этого явления и его количественное описание.

Способы нагружения образцов при испытаниях

Основным отличием предлагаемых способов является возможность стабилизации в процессе испытаний параметров цикла термомеханических напряжений, задаваемых в широком диапазоне их изменения.

Указанные способы иллюстрированы схемами, приведенными на рис. 1 и 2. Графики на этих рисунках качественно иллюстрируют циклическое изменение температуры $T(t)$, термомеханических напряжений σ_{TM} , а также свободных тепловых $\varepsilon_{св}$, упругих $\varepsilon_{упр}$, неупругих $\varepsilon_{неупр}$ и полных $\varepsilon_{полн}$ деформаций образца.

1. Нагружение с высокими положительными уровнями асимметрии цикла термомеханических нагрузок (рис. 1, а) достигается установкой следя-

щего устройства автоматического защемления образца на внешней по отношению к образцу плоскости упругой диафрагмы, которая препятствует в каждом цикле охлаждения термическому сокращению длины образца, предварительно нагруженного статическими напряжениями растяжения.

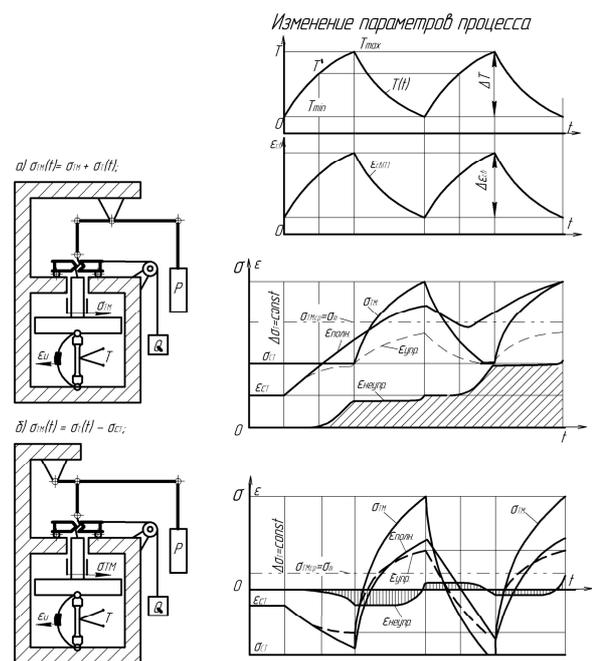


Рис. 1. Термомеханическое нагружение с высокими (а) и низкими положительными (б) уровнями асимметрии циклов

В первом полуцикле нагрева образец нагружается силой P через рычаг первого рода, в результате чего в нем возникают напряжения растяжения $\sigma_{СТ}$,

не изменяющиеся в течение всего полуцикла. Под воздействием этих напряжений при увеличении температуры образца его полная деформация $\varepsilon_{полн}$ будет увеличиваться за счет уменьшения модуля упругости материала. При увеличении температуры образца выше некоторого значения T' в нем будут накапливаться неупругие деформации $\varepsilon_{неупр}$ из-за превышения напряжением $\sigma_{СТ}$ предела пропорциональности материала и развития пластических деформаций и ползучести.

Суммарное удлинение образца при нагреве приведет в действие следящий механизм его автоматического заземления. В процессе нагрева этот механизм не препятствует удлинению образца. В полуцикле охлаждения гайка препятствует сокращению длины образца при уменьшении температуры. Благодаря этому в образце возникают термические напряжения растяжения σ_T , которые, суммируясь с напряжениями $\sigma_{СТ}$, приводят к увеличению термомеханических напряжений $\sigma_{ТМ}$ при уменьшении температуры от T_{max} до T_{min} от значения $\sigma_{СТ}$ до величины $\sigma_{СТ} + \Delta\sigma_T$.

В следующем полуцикле нагрева термические напряжения растяжения будут уменьшаться в заземленном образце за счет его термического удлинения. Уменьшение термических напряжений будет происходить до тех пор, пока суммарное удлинение образца при нагреве не достигнет значения, при котором в начале предыдущего цикла охлаждения гайкой-барабаном образец был заземлен в силовой раме. Это произойдет при температуре, несколько меньшей максимальной температуры цикла T_{max} за счет того, что в предыдущем полуцикле охлаждения в образце была накоплена остаточная деформация растяжения, увеличившая суммарную длину образца. При этой температуре образец освобождается от заземления, в результате чего на него будет воздействовать только усилие груза P , вызывающее

напряжение $\sigma_{СТ}$. В процессе дальнейшего увеличения температуры до T_{max} увеличение суммарного удлинения образца приведет в действие следящий механизм, таким же образом, как и в предыдущем полуцикле нагрева. При этом минимальное значение цикла термомеханических напряжений будет строго ограничиваться величиной $\sigma_{СТ}$.

Описанный процесс изменения термомеханических напряжений будет циклически повторяться в той же последовательности (до предельного состояния или разрушения образца).

Автоматическое заземление образца в начале каждого полуцикла охлаждения приводит, при постоянном размахе температур $\Delta T = const$, к неизменности размаха термомеханических напряжений $\Delta\sigma_{ТМ} = const$ за счет накопления остаточных неупругих деформаций растяжения. В этом заключается стабилизирующее действие механизма автоматического заземления образца.

В рассматриваемой схеме статической нагрузкой могут быть заданы высокие положительные уровни асимметрии циклических термомеханических напряжений, так как даже при отсутствии статической нагрузки в образце будут создаваться положительные циклические термонапряжения по пульсирующему циклу, под действием которых в образце будет накапливаться неупругая остаточная деформация растяжения.

2. Нагружение образца с низкими положительными уровнями асимметрии цикла термомеханических напряжений стабилизированных параметров (рис. 1, б) обеспечивается путем установки следящего устройства на внешней плоскости упругой диафрагмы, препятствующей термическому сокращению длины образца, предварительно сжатого напряжениями $\sigma_{СТ}$.

В первом полуцикле охлаждения ненагруженного образца к нему с помощью груза P прикладываются статические напряжения сжатия $\sigma_{СТ}$, которые

остаются неизменными в течение последующего полуцикла нагрева, так как следящий механизм не препятствует тепловому удлинению образца. В начале следующего полуцикла охлаждения, с помощью следящего механизма образец автоматически защемляется в силовой раме, что приводит к возникновению в нем термических напряжений растяжения, которые увеличиваются с понижением температуры. При значениях статических напряжений сжатия, меньших по абсолютной величине половины размаха термических напряжений $\Delta\sigma_T$, термомеханические напряжения σ_{TM} изменяют знак на некотором этапе охлаждения образца, достигая в конце полуцикла охлаждения максимального положительного значения.

В следующем полуцикле нагрева происходит уменьшение термических напряжений, обусловленное тепловым удлинением защемленного образца. Это уменьшение приводит к перемене знака термомеханических напряжений σ_{TM} , которые достигают значения заданных статических напряжений сжатия σ_{CT} в тот момент, когда гайка следящего механизма освобождает образец от защемления в силовой раме. Освобождение образца от защемления произойдет при температуре несколько меньшей максимальной температуры цикла T_{max} за счет того, что в конце предыдущего полуцикла охлаждения суммарная длина образца была увеличена из-за накопленной неупругой деформации $\varepsilon_{неупр}$ растяжения. При дальнейшем увеличении температуры до значения T_{max} термомеханические напряжения будут строго ограничены величиной статических напряжений сжатия σ_{CT} , задаваемых грузом P .

В начале полуцикла охлаждения вновь происходит автоматическое защемление образца, приводящее к возникновению термических напряжений растяжения, и цикл нагружения повторяется в той же последовательности.

В рассмотренном примере подбором величины груза P цикл термомеханических напряжений стабилизированных параметров может быть изменен от пульсирующего в положительной области (при $P = 0$), до цикла, близкого к симметричному. При пульсирующем цикле в образце будет накапливаться остаточная деформация растяжения, а при цикле, близком к симметричному, происходит неупругое деформирование образца с переменной знака внутри каждого цикла, практически без существенного накопления остаточных деформаций.

3. Нагружение с низкими отрицательными уровнями асимметрии цикла термомеханических напряжений стабилизированных параметров (рис. 2, а) обеспечивается установкой следящего устройства на внутренней плоскости упругой диафрагмы, препятствующей в каждом полуцикле нагрева термическому удлинению предварительно растянутого образца.

В начале полуцикла нагрева ненагруженного образца к нему прикладывается статическое напряжение растяжения и осуществляется автоматическое его защемление, препятствующее удлинению при увеличении температуры. В конце полуцикла охлаждения осуществляется автоматическое освобождение образца от защемления и повторное приложение статических напряжений растяжения исходного уровня. Цикл повторяется.

В рассмотренном варианте подбором статической растягивающей нагрузки цикл термомеханических напряжений стабилизированных параметров может быть изменен от пульсирующего в отрицательной области (при $P = 0$) до цикла, близкого к симметричному.

При пульсирующем цикле в образце следует ожидать накопление остаточных деформаций сжатия, а при цикле, близком к симметричному, происходит неупругое деформирование образца с переменной знака внутри каждого цикла, практически без накопления остаточных деформаций.

4. При нагружении термомеханическими напряжениями с высокими отрицательными уровнями асимметрии цикла (рис. 2, б) к образцу с циклически изменяющейся температурой в начале полуцикла нагрева прикладываются статические напряжения сжатия и осуществляется автоматическое его заземление, препятствующее удлинению при увеличении температуры. В конце полуцикла охлаждения происходит автоматическое освобождение образца от заземления и повторное приложение статических напряжений сжатия исходного уровня. Цикл повторяется.

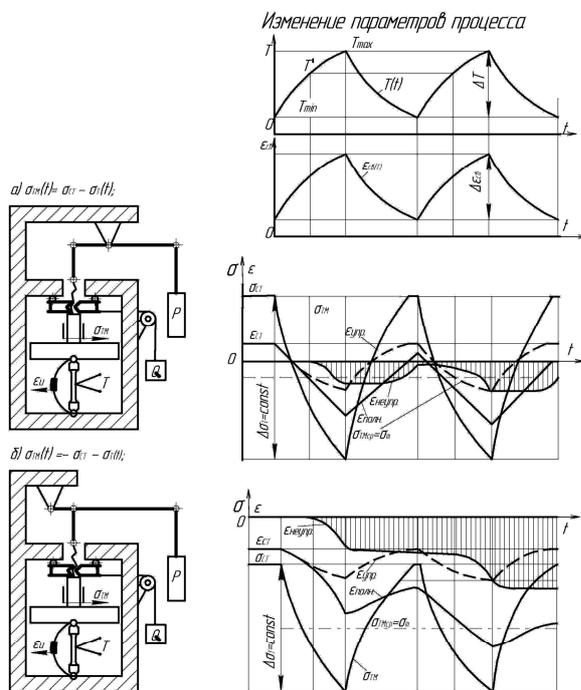


Рис. 2. Термомеханическое нагружение с низкими (а) и высокими (б) отрицательными уровнями асимметрии циклов

По рассматриваемой схеме статической нагрузкой могут быть заданы высокие отрицательные уровни асимметрии цикла термомеханических напряжений, при которых будет иметь место наиболее интенсивное накопление неупругих деформаций сжатия, так как даже при отсутствии статиче-

ской нагрузки в образце будут создаваться отрицательные циклические напряжения по пульсирующему циклу, которые могут привести к существенному накоплению неупругих остаточных деформаций сжатия.

Заключение

Применение вышеописанных способов термомеханического нагружения позволит охватить при испытаниях все возможные диапазоны изменения асимметрии цикла и размахов термоциклических напряжений стабилизированных экстремальных уровней.

Литература

1. Ветров А.Н., Ковешников Н.А. Исследование долговечности жаропрочных сплавов. – К., 1986. – 398 с.
2. Третьяченко Г.Н., Кравчук Л.В., Курият Р.И., Волощенко А.П. Несущая способность лопаток газовых турбин. – К.: Наук. думка, 1975. – 290 с.
3. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Прочность материалов и элементов конструкции в экстремальных условиях. – К.: Наук. думка, 1980. – Т. 1. – 535 с.
4. Грязнов Б.А., Городецкий С.С., Налимов Ю.С. и др. Усталость жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД / Отв. ред. В.Т. Трощенко. – АН Украины. Ин-т пробл. прочности. – К.: Наук. думка, 1992. – 264 с.
5. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 268 с.

Поступила в редакцию 2.10.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Тamarгазин, Национальный авиационный университет, Киев.