

О.В. Кузьмин<sup>1</sup>, Е.А. Тихомирова<sup>1</sup>, М.Ю. Сундуков<sup>1</sup>,  
Т.Н. Азизов<sup>2</sup>, Е.Ф. Сидохин<sup>3</sup>

## НОВЫЙ СПОСОБ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ В АВИАЦИОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Рассматривается способ термоциклических испытаний материалов, доступный при производственном контроле, удобный для оценочных испытаний при назначении материала в состав конструкции (изделия). Разработанное автономное устройство представляет собой абсолютно жесткую рамку по отношению к жесткости образца. Для задания величины упругопластической деформации ( $\Delta\varepsilon$ ) при термоциклических испытаниях рамка должна быть выполнена из материала, отличающегося от материала испытываемого образца по показателю температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР).*

**Ключевые слова:** термическая усталость, термоциклические испытания, термическое расширение, жесткость.

О.В. Kuzmin<sup>1</sup>, Е.А. Tikhomirova<sup>1</sup>, М.Ю. Sundukov<sup>1</sup>, Т.Н. Azizov<sup>2</sup>, Е.Ф. Sidokhin<sup>3</sup>

## A NEW THERMO-CYCLIC TESTING METHOD TO MEASURE THERMAL FATIGUE RESISTANCE OF MATERIALS IN AERONAUTICAL ENGINEERING

*A method of thermo-cyclic testing of materials available for production control convenient for evaluation tests at assignment of materials in a construction (or an article) is considered. The developed self-contained unit is an absolutely rigid frame in respect of the rigidity of a sample. With the task to preset a value of elasto-plastic strain ( $\Delta\varepsilon$ ) at thermo-cyclic tests the frame has to be made from a material different from that of a sample in terms of linear thermal expansion coefficient (LTEC).*

**Keywords:** thermal fatigue, thermo-cyclic testing, linear thermal expansion coefficients, stiffness.

<sup>1</sup>ОАО «Климов» [ОАО «Klimov»] E-mail: tixomirova00@mail.ru

<sup>2</sup>ОАО «ММП им. В.В. Чернышева» [ОАО «MMP name V.V. Chernishova»] E-mail: azizov-06@yandex.ru

<sup>3</sup>ЗАО «НТЦ Экспертцентр» [ZAO «NTC Expertcentre»] E-mail: esidohin@yandex.ru

Термическая усталость является важной характеристикой жаропрочных материалов. Способность материалов оказывать ей сопротивление контролируют с помощью термоциклических испытаний, включающих в себя периодический нагрев и охлаждение образца, стесненного в отношении термической деформации. Степень стеснения зависит и регулируется жесткостью связей закрепленного образца. Вследствие этого материал образца в процессе нагрева и охлаждения подвергается упругопластической деформации  $\Delta\varepsilon$ , величина которой определяется создаваемой жесткостью. Стенд для термоциклических испытаний с варьируемой жесткостью [1] представляет собой раму, которая включает жесткие стойки и массивные траверсы, соединенные со стойками упругими связями, либо обоймы с упругими элементами (рис. 1). В качестве последних используют мембраны различной толщины. Стенды комплектуются системами регулирования температуры и измерения напряжений и упругопластической деформации.

Нагрев образца в процессе испытаний осуществляют различными способами, например, пропусканием электрического тока [1, 2]. В зависимости от характера решаемой задачи образцы для испытаний на «растяжение–сжатие» могут иметь различную

форму: цилиндрические сплошные или трубчатые, корсетные сплошные или трубчатые либо плоские [2].

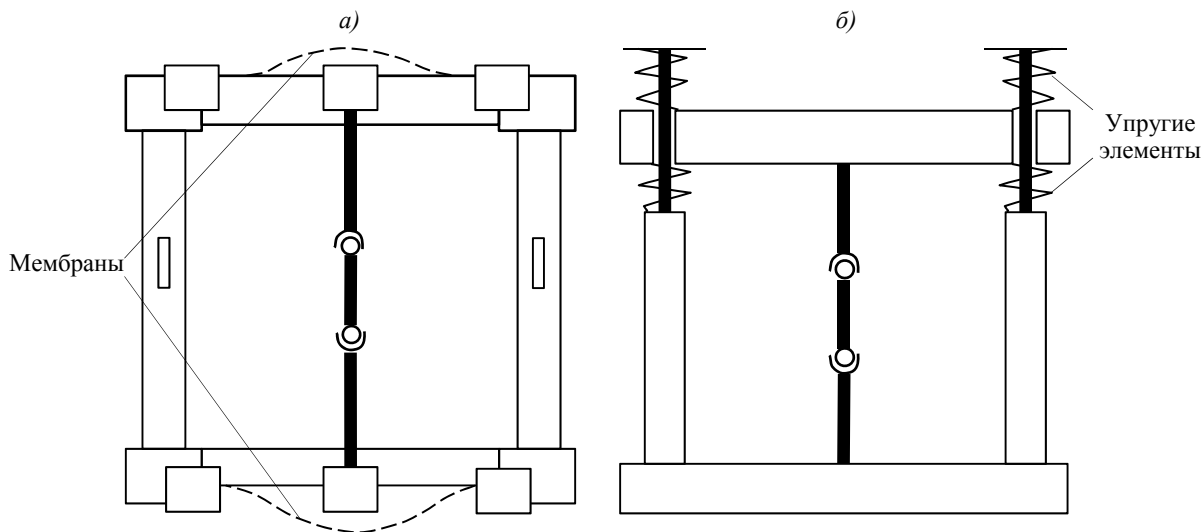


Рис. 1. Принципиальные схемы установок для испытаний на термоусталость при варьировании упругопластической деформацией образца мембранами (а) и упругими элементами (б)

Характерная особенность известных стенов состоит в том, что в процессе испытаний нагреву подвергают образец, тогда как температура нагружающей рамы остается неизменной. Это позволяет стенду быть достаточно вариативным в исследовании, но имеются и свои недостатки:

- низкая производительность из-за очень продолжительного испытания одного образца;
- невозможность без ущерба для результата прерывать процесс для промежуточных исследований неразрушающими методами, например, металлографическими, рентгеновскими, методом сканирующей микроскопии и др., или производить измерения.

Аналогичная ситуация имела место в исследованиях релаксации напряжений. Решение проблемы было достигнуто тем, что исследования на стационарных установках дополнены исследованиями на кольцах Одинга или Давиденкова [3], которые представляют собой и образцы, и устройство для испытаний одновременно.

Предлагаемое автономное устройство дополняет возможности стационарных установок и представляет собой абсолютно жесткую рамку по отношению к жесткости образца. На двух стенках рамки расположены средства закрепления головок образца. Габарит самой рамки ненамного больше размеров общепринятого для термоциклических испытаний образца круглого или прямоугольного сечения. Профиль стенок рамки для улучшения нагрева и охлаждения желательнее выполнять ребристым. Для задания величины упругопластической деформации при термоциклических испытаниях рамка должна быть выполнена из материала, отличающегося от материала испытуемого образца температурным коэффициентом линейного расширения  $\alpha_{\text{ср}}$  (ТКЛР). Для получения максимальной величины  $\Delta\epsilon$ , т. е. для полного перехода термической деформации  $\epsilon_T$  в  $\Delta\epsilon$ , рамка должна быть выполнена из материала с близким к нулю значением ТКЛР ( $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рама}}$ ), например, из кварца, кремния или инвара. В рамке из материала, у которого  $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рама}} > 0$ , но меньше, чем у образца  $\alpha_{\text{ср}}^{\text{обр}}$ , задаваемое значение  $\Delta\epsilon$  меньше, чем в первом случае. При этом в ходе изменения температуры нагрев сопровождается деформацией

сжатия, а охлаждение – деформацией растяжения. В том же случае, когда рамка изготовлена из материала, у которого  $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рама}} > \alpha_{\text{ср}}^{\text{обр}}$ , в ходе испытаний растяжение происходит, наоборот, при нагреве, а сжатие – при охлаждении. Эта схема в настоящее время не выполнима на стационарных установках, но может реализоваться на практике в ходе развития термической усталости изделий и поэтому представляет интерес для исследований. При выполнении рамки и образца из материалов с разными значениями  $\alpha_{\text{ср}}$ , задаваемая величина упругопластической деформации составляет:  $\Delta\varepsilon \approx (\alpha_{\text{ср}}^{\text{рама}} - \alpha_{\text{ср}}^{\text{обр}}) \Delta T$ , где  $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$  размах изменения температуры в цикле испытаний.

В качестве иллюстрации рассмотрим подбор материала рамки для термоциклических испытаний жаропрочного никелевого сплава (ЖНС) для турбинных лопаток. Испытания этих сплавов проводят в диапазоне температур  $\sim 100\text{--}1000^\circ\text{C}$ , как правило, при трех значениях задаваемой величины  $\Delta\varepsilon$ : 0,6; 1,0 и 1,3% [4]. У этих сплавов  $\alpha_{\text{ср}}^{\text{обр}} \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ . Рамка, выполненная из кварца или инвара, позволила бы получить  $\Delta\varepsilon \approx 1,3\%$ . Однако ТКЛР кварца и инвара существенно изменяются в указанном интервале температур, и получить желаемое не представляется возможным. Рамка, выполненная из Si ( $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рама}} \approx 2,3 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ), позволит получить  $\Delta\varepsilon \approx 1,1\%$ ; из Mo или W ( $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рама}} \approx 4,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) –  $\Delta\varepsilon \approx 0,9\%$ ; из Ti ( $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рама}} \approx 7,2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) –  $\Delta\varepsilon \approx 0,7\%$ ; а из стали ( $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рама}} \approx 11 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) –  $\Delta\varepsilon \approx 0,3\%$ .

Примеры возможных вариантов исполнения рамки с образцом показаны на рис. 2. Вариант б (см. рис. 2) особенно удобен для изготовления. В этом случае элементы рамки выполняются из разных материалов. Пластина, параллельная оси образца, должна быть изготовлена из материала с отличающимся от материала образца ТКЛР. Выбор же материала для стоек, перпендикулярных пластине, на которых подвешивают образец, не имеет значения и они могут быть из нержавеющей стали.

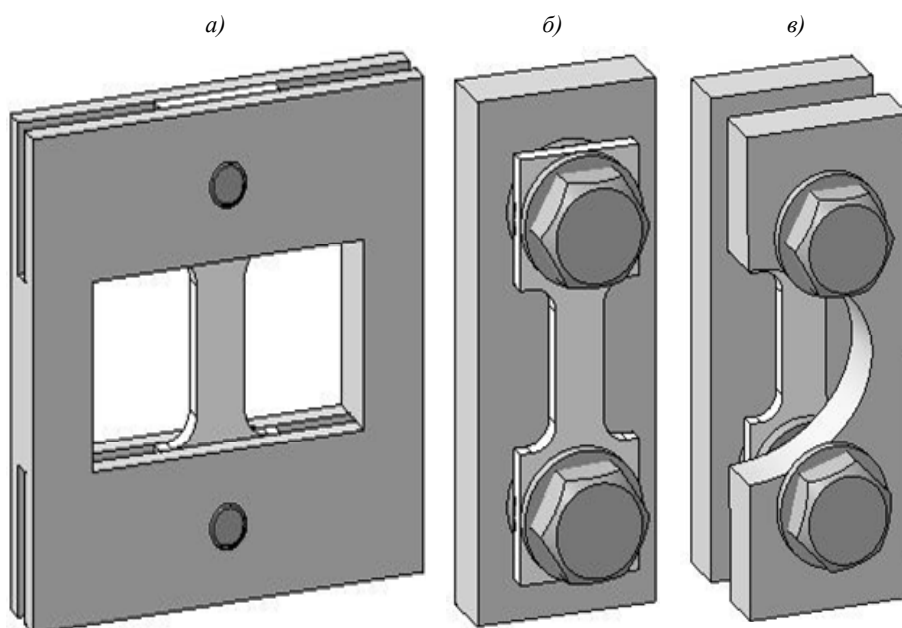


Рис. 2. Варианты исполнения рамок для термоциклических испытаний:

*а* – рамка прямоугольной формы; *б* – пластина со стойками для крепления образца; *в* – опорная и прижимная пластины со стойками крепления образца между ними

Последовательность действий при реализации способа сводится к тому, что рамку с закрепленным в ней образцом или несколько рамок, собранных в виде кассеты, по-

следовательно вводят в рабочее пространство печи, выдерживают там до установления верхней температуры цикла, а затем перемещают в охладитель, где опять выдерживают до установления нижней температуры. В этих условиях решается такая важная проблема испытаний, с которой сталкиваются в стационарных установках, как равномерность температуры по длине расчетной части образца, поскольку он нагревается целиком, а современные печи имеют хорошие характеристики по равномерности распределения температуры в рабочем объеме.

К числу достоинств описанного способа следует отнести возможность прерывать испытание, по крайней мере, при нижней температуре, не разгружая образец, для проведения структурных исследований неразрушающими методами и вновь возвратить его в процесс испытаний.

Большим преимуществом является и то, что для осуществления испытаний требуется всего лишь нагреватель и простой подающий механизм, при этом можно набирать рамки в кассеты и проводить одновременно испытание группы образцов по разным схемам, но в одинаковых условиях. Простота применяемого устройства и возможность его изготовления в условиях предприятия, осуществляющего контроль своей продукции, а также простота необходимых технических средств делает возможным проведение термоциклических испытаний в условиях заводских лабораторий, не привлекая для этого сложное специализированное дорогостоящее оборудование.

Наконец, придавая рамке и образцу определенную расчетную форму можно производить в испытаниях моделирование работы реальных изделий или их отдельных участков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термическая усталость металлов. М.: Машиностроение. 1980. 200 с.
2. Гецов Л.Б., Добина Н.И., Рыбников А.И., Семенов А.С., Старосельский А., Туманов Н.В. Сопротивление термической усталости монокристаллического сплава //Проблемы прочности. 2008. №5. С. 54–71.
3. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение. 1974. С. 17.
4. Дульнев Р.А., Светлов И.Л., Бычков Н.Г., Рыбина Т.В., Суханов Н.Н., Гордеева Т.А., Доброхвалова Е.Н., Епишин А.И., Кривко А.И., Назарова М.П. Ориентационная зависимость термической усталости монокристаллов никелевого сплава //Проблемы прочности. 1988. №11. С. 3–9.

#### REFERENS LIST

1. Dul'nev R.A., Kotov P.I. Termicheseskaja ustalost' metallov [Thermal fatigue of metals]. M.: Mashinostroenie. 1980. 200 s.
2. Gecov L.B., Dobina N.I., Rybnikov A.I., Semenov A.S., Starosel'skij A., Tumanov N.V. Soprotivlenie termicheskoj ustalosti monokristallicheskogo splava [Thermal fatigue resistance of single-crystal alloy] //Problemy prochnosti. 2008. №5. S. 54–71.
3. Henkin M.L., Lokshin I.H. Razmernaja stabil'nost' metallov i splavov v tochnom mashinostroenii i priborostroenii [Dimensional stability of metals and alloys in exact mechanical engineering and instrument making]. M.: Mashinostroenie. 1974. S. 17.
4. Dul'nev R.A., Svetlov I.L., Bychkov N.G., Rybina T.V., Suhanov N.N., Gordeeva T.A., Dobrohvalova E.N., Epishin A.I., Krivko A.I., Nazarova M.P. Orientacionnaja zavisimost' termicheskoj ustalosti monokristallov nikellevogo splava [Orientation dependence of thermal fatigue of monocrystals of a nickel alloy]//Problemy prochnosti. 1988. №11. S. 3–9.