

УДК 621.452.3:669.018.44:539.431

Д. Ф. СИМБИРСКИЙ, А. А. БРУНАК

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ВЛИЯНИЕ ВЫДЕРЖЕК В ЦИКЛЕ НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА ЖС-6КП НА ИХ СОПРОТИВЛЕНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Рассмотрен и экспериментально для примера сплава ЖС-6КП при рабочей температуре 1000°С подход к повышению эффективности разрабатываемого метода учета влияния выдержек на максимальных режимах циклического нагружения образцов сплава при их испытаниях на сопротивление малоциклового усталости (МЦУ). Подход основан на уточнении известных закономерностей повторно-статической усталости материала по вопросу использования альтернативных общепринятых коэффициентов чувствительности материала к количеству прерываний нагружения. Эффективность подхода подтверждается путем сравнения расчетных и экспериментально полученных моделей МЦУ указанного материала в условиях выдержек на максимальных режимах его циклического нагружения.

Ключевые слова: повторно-статическая усталость, малоцикловая усталость, экспериментальное подтверждение, выдержки в цикле нагружения, сплав ЖС-6КП.

1. Постановка задачи

Одной из актуальных проблем прогнозирования малоциклового долговечности деталей авиационных ГТД является учет влияния выдержек на максимальных (взлетных) режимах работы двигателя при выполнении им реальных полетных циклов. В научно-практическом плане эта проблема выглядит как прогнозирование сопротивления материала детали малоциклового усталости (МЦУ) в условиях повторяющегося от одного полетного цикла к другому отнулевого трапециевидного цикла нагружения с выдержкой τ_B на максимальном режиме (рис. 1а).

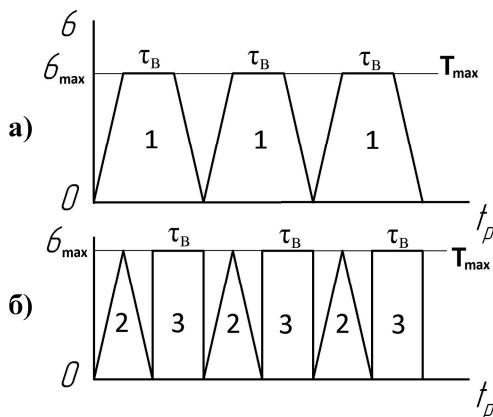


Рис. 1. Представление реального отнулевого трапециевидного полетного цикла нагружения 1 (а) в виде суммы отнулевого треугольного цикла МЦН 2 и цикла ПСН 2 (б)

Предложен метод решения указанной проблемы, основанный на представлении реального трапециевидного цикла в виде суммы двух отнулевых циклических воздействий (рис. 1б): треугольного малоциклового нагружения (МЦН) и П-образного цикла повторно-статического нагружения (ПСН) и линейного суммирования повреждений материала детали от МЦН и ПСН с учетом их взаимного влияния [1].

В методе используются закономерности ПСН и повторно-статической усталости (ПСУ), традиционное изложение которых приведено, например, в работах [2-5].

Метод реализован для жаропрочного сплава ЖС-6К при рабочих температурах 800°С и 1000°С и ЭИ-437Б при температуре 750°С и доведен до построения соответствующих моделей МЦУ при различных значениях выдержек в цикле τ_B . Для сплава ЭИ-437Б получено удовлетворительное количественное совпадение расчетных данных с экспериментальными [1].

В последующем получено экспериментальное подтверждение метода путем построения экспериментальных кривых МЦУ при наличии выдержки в цикле для сплава ЖС-6КП при температуре 1000°С на основании опытных данных [6,7] и их сравнение с расчетными кривыми МЦУ. В работе [8] путем углубленной обработки тех же опытных данных [6,7] исследованы положенные в основу метода закономерности ПСУ для сплава ЖС-6КП, обнаружены некоторые их отличия от традиционного взгляда и предложены альтернативные варианты коэффициента чувствительности материала к ПСН.

В связи с изложенным, в настоящем исследовании поставлены следующие задачи:

1. Внести изменения в алгоритм предложенного метода учета выдержек в цикле нагружения [1], которые следуют из проведенных в [9] исследований закономерностей ПСУ сплава ЖС-6КП по экспериментальным данным [6,7].

2. По данным [6,7] построить экспериментальные кривые МЦУ для сплава ЖС-6КП с учетом выдержек в цикле и сравнить их с соответствующими расчетными кривыми МЦУ, полученными с помощью уточненного метода [1].

2. Основные положения предложенного метода

2.1. Закономерности ПСН [2-5]

Закономерности и представление ПСН как длительного статического нагружения (ДСН) при повышенных температурах с z прерываниями нагружения многократно рассматривались в технической литературе, в частности, и в работах [2-5]. В их основу положено предложенное В.И. Цейтлиным [2] понятие **коэффициента чувствительности материала K_z к количеству z повторных нагружений** статическим напряжением σ (при повышенных температурах) или, что то же, прерываний такого нагружения. При заданной температуре T предложенная зависимость для K_z имеет вид

$$K_z = \frac{\sigma(T, t_p)}{\sigma_z[T, t_{pz}]}, \quad (1)$$

где $\sigma(T, t_p)$ – предел ДП материала, определяемый по следующей распространенной модели

$$\sigma(T, t_p)^{m(T)} \cdot t_p = A(T) \quad (2)$$

или в логарифмических координатах

$$m(T) \cdot \lg \sigma(T, t_p) + \lg t_p = \lg A(T), \quad (3)$$

$\sigma_z[T, t_{pz}]$ – предел ДП прочности материала при условии z прерываний нагружения, температуре T и времени до разрушения t_{pz} , который следует, на наш взгляд, квалифицировать как **предел ПСУ материала**;

$t_p = t_p(\sigma, T)$ и $t_{pz} = t_p(\sigma, T, z)$ – времена до разрушения при непрерывном и с z прерываниями нагружений материала, соответственно. В [1] получено, что t_p и t_{pz} связаны между собой следующим приближенным соотношением

$$t_{pz} = t_p \cdot [K_z]^{m(T)} \quad (4)$$

На рисунке 2 приведены геометрические представления, поясняющие физический смысл формулы (1) и ее составляющих.

В работах [2, 3] показано, что $K_z < 1$ и что тогда из (1) следует неравенство $t_{pz} < t_p$. Это, по мнению авторов, означает, что при ПСН долговечность соответствует некоторому **фиктивному напряжению**

$$\sigma_\phi[T, t_{pz}] = \frac{1}{K_z} \cdot \sigma(T, t_p).$$

Кроме того, авторы [2,3] для построения модели ПСУ используют зависимость (2) с таким же значением параметра $m(T)$, а также полагают независимость $m(T)$ от величины приложенного напряжения $\sigma(T, t_p) = \sigma_z[T, t_{pz}]$.

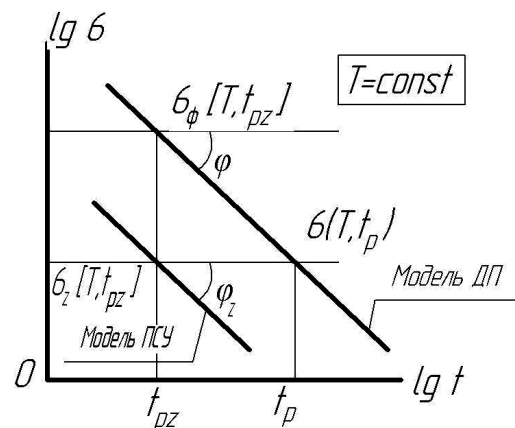


Рис. 2. Взаимное расположение исходной модели ДП ($z=1$) и модели ПСУ при $z > 1$

Последнее определяет параллельное расположение моделей ДП и ПСУ в логарифмических координатах, тангенс углов наклона ϕ_z которых равен $1/m$.

Зависимость K_z от z , определяющая основные закономерности ПСУ, находится из эксперимента и с достаточной точностью в пределах $1 \cdot 10 < z < 1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$, как показано в технической литературе [3-5], может быть аппроксимирована линейной полулогарифмической зависимостью типа

$$K_z = -k_1 \lg z + k_2. \quad (5)$$

На рисунке 3 в качестве иллюстрации приведены известные экспериментальные зависимости K_z от z .

Приведенные выше закономерности ПСУ использованы в предложенном нами методе учета влияния выдержек в цикле нагружения материала на его МЦУ [1]. Один из этапов верификации метода заключался в проведении сравнения, которое признано положительным [8], полученных с его помощью расчетных кривых МЦУ сплава ЖС-6КП при наличии выдержек в цикле нагружения с кривыми МЦУ, полученными на основе экспериментальных данных [6, 7].

В настоящем исследовании на основе продолжения обработки опытных данных [6, 7] решается задача экспериментального подтверждения и уточнения приведенных выше закономерностей ПСУ.

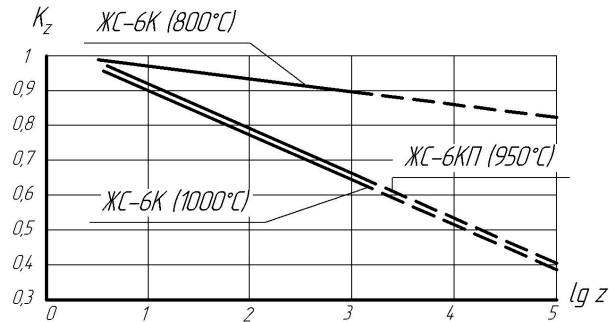


Рис. 3. Зависимости коэффициента K_z от количества прерываний нагрузений z для сплавов ЖС-6К и ЖС-6КП

2.2. Линейное суммирование повреждений материала от составляющих нагрузений с учетом их взаимного влияния [1]

В принятой схеме нагружения материала суммарное повреждение Π_Σ может быть представлено линейной суммой повреждений от двух составляющих нагрузений: $\Pi_{МЦУ} = \frac{z_{p\Sigma}}{z_p(\sigma_{max}, T_{max})}$, вызываемого отнулевым треугольным циклом МЦН, и $\Pi_{ПСУ} = \frac{\tau_\Sigma}{t_{pz}}$, вызываемого ПСН с выдержками τ_B , суммарная длительность которого $t_\Sigma = z_{p\Sigma} \cdot \tau_B$, а величина t_{pz} – время до разрушения с учетом $z_{p\Sigma}$ прерываний нагружения при ПСН, которое связано с t_p зависимостью (4); $z_{p\Sigma}$ – количество треугольных циклов МЦН и, одновременно, прерываний нагружения в ПСН; $z_p(\sigma_{max}, T_{max})$ – количество треугольных циклов МЦН до разрушения.

Тогда условие разрушения детали, из которого можно найти ее циклическую долговечность $z_{p\Sigma}$, можно представить в виде

$$\Pi_\Sigma = \Pi_{МЦУ} + \Pi_{ПСУ} = \frac{z_{p\Sigma}}{z_p(\sigma_{max}, T_{max})} + \frac{z_{p\Sigma} \cdot \tau_B}{t_{pz}} = \frac{z_{p\Sigma}}{z_p(\sigma_{max}, T_{max})} + \frac{z_{p\Sigma} \cdot \tau_B}{t_p(\sigma_{max}, T_{max}) \cdot [K_z]^{m(T)}} \geq 1. \tag{6}$$

В [1] показано, что решение нелинейного уравнения (6) относительно $z_{p\Sigma}$ можно осуществить методом подбора с помощью пакета Excel. С помощью метода половинного деления, программно реа-

лизованного на языке С++, получено подтверждение достаточно высокой точности метода подбора.

3. Исследование закономерностей ПСУ сплава ЖС-6КП на основе экспериментальных данных [6,7]

Значительный объем исследований по вопросу подтверждения достоверности (верификации) и эффективности предложенного метода [1] выполнен на базе экспериментальных данных, полученных в [6, 7] при испытаниях стандартных образцов из сплава ЖС-6КП на циклическую долговечность в условиях выдержек в цикле нагружения.

Испытания [6, 7] проводились в потоке продуктов сгорания авиационных керосиновых топлив при синхронном изменении температуры и напряжения в цикле с полной разгрузкой после выдержек τ_B при различных σ_{max} и $T_{max}=1000^\circ\text{C}$, и охлаждением до $T_{min}=350^\circ$. Реализация указанных на рис. 4б законов изменения температуры и механического нагружения осуществлялась с помощью автоматизированной системы управления испытаниями.

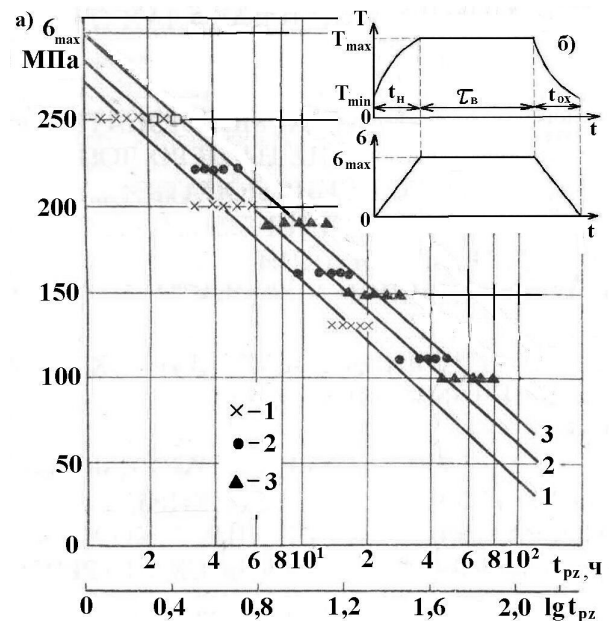


Рис. 4. Исходные экспериментальные кривые долговечности $\sigma_{max} - t_{pz}$ (а) и законы изменения σ , и T (б): 1 – $\tau_B=0,5$ мин, 2 – $\tau_B=5$ мин, 3 – $\tau_B=60$ мин

При испытаниях образцов использовался один режим термоциклирования $T_{min} \leftrightarrow T_{max}=350 \leftrightarrow 1000^\circ\text{C}$ со скоростью нагрева и охлаждения 50 град/с. Таким образом, время термоцикла нагрев-охлаждение без выдержки τ_B принято равным $t_H + t_{охл} = 0,5$ мин. На этом одном режиме задавались три значения выдержек τ_B : 0,5 мин, 5 мин и 60 мин, а для каждого зна-

чения τ_B – по три значения максимальных напряжений σ_{\max} : 100, 200 и 250 МПа. На каждом из указанных девяти вариантов термомеханических нагружений до разрушения доводились по пять образцов.

По результатам статистической обработки установлено [6], что полученные кривые долговечности (рис.4а) для каждого значения τ_B могут быть аппроксимированы линейными функциями в логарифмическом масштабе по времени до разрушения

$$\sigma_{\max} = A + B \lg t_{pz}, \quad (7)$$

где A , B – коэффициенты, различные для трех величин выдержек в цикле.

3.1. Экспериментальные модели ПСУ сплава ЖС-6КП [9]

В работе [9] детально описана технология определяющего этапа обработки экспериментальных данных [6, 7] – построения моделей ПСУ сплава ЖС-6КП при $T_{\max}=1000^\circ\text{C}$ для трех значений $z=100$; 200 и 300 прерываний нагружения, каждая из которых включает по три значения $\tau_B=0,5$ мин; 5 мин и 60 мин, то есть всего девять экспериментальных точек « $\sigma_{\max} - t_{pz}$ ».

На рисунке 5 для рабочей температуры $T_{\max}=1000^\circ\text{C}$ приведены исходная модель ДП сплава ЖС-6КП, построенные только по экспериментальным данным [6,7], модели ПСУ для трех значений z . Последние аппроксимированы путем статистической обработки указанных выше 9-ти точек, которые представлены линиями регрессии в логарифмической системе координат в следующей форме, аналогичной (3) для исходной кривой ДП

$$m_z \cdot \lg \sigma(T, t_{pz}) + \lg t_{pz} = \lg A_z, \quad (8)$$

где величины $m_z = m_z(T, z)$ и $A = A_z(T, z)$ для трех значений z прерываний нагружения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты m_z и A_z аппроксимации (8) кривых ПСУ

Z, циклов	m_z	$\lg A_z$
100	3,55	8,72
200	2,74	6,82
300	2,42	5,98

Необходимо подчеркнуть, что приведенные на рис. 5 модели ПСУ сплава ЖС-6КП построены исключительно по результатам прямых экспериментальных данных [6, 7].

В [9] по экспериментальным моделям ПСУ построены также чисто экспериментальные зависимости для коэффициентов чувствительности материала к прерываниям нагружения от z и некоторых других

факторов, что позволило провести детализированное исследование их особенностей.

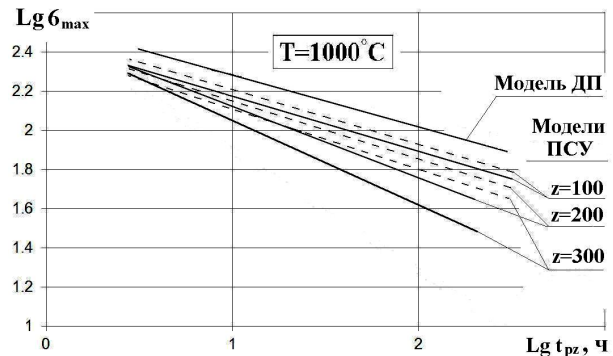


Рис. 5. Исходная модель ДП и экспериментальные модели ПСУ сплава ЖС-6КП для различных значений z . Пунктирные линии – модели ПСУ, построенные при условии независимости K_z от σ_{\max} по данным [3]

3.2. Коэффициенты чувствительности сплава ЖС-6КП к прерыванию нагружения

Качественный анализ взаимного расположения моделей ДП и полученных ПСУ сплава ЖС-6КП (рис. 5) для различных z свидетельствует, что коэффициент K_z , определяемый формулой (1) и рис. 1, зависит от величины σ_{\max} .

Для количественного анализа зависимости K_z от σ_{\max} в [9] использованы аппроксимации z -товых моделей ПСУ типа (8), коэффициенты m_z и A_z которых приведены в таблице 1. Из рисунка 6 следует существенный разброс коэффициента K_z по σ_{\max} . Кроме того, использование K_z приводит к условности из-за участия в его определении некоего понятия «фиктивного напряжения» $\sigma_{\text{ф}}[t, t_{pz}]$ (см. раздел 2.1).

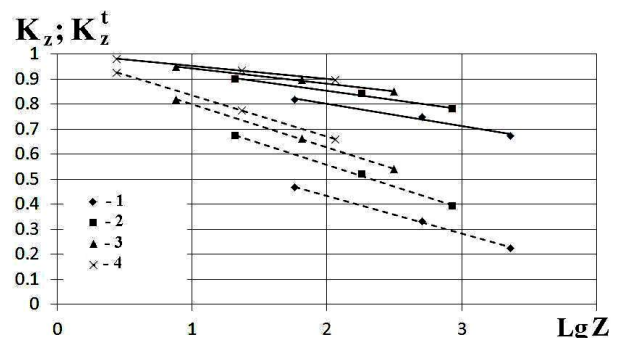


Рис. 6. Коэффициенты чувствительности сплава ЖС-6КП к прерыванию нагружения K_z и K_z^t (пунктир), построенные для различных значений σ_{\max} : 1 – 100 МПа, 2 – 150 МПа, 3 – 200 МПа, 4 – 250 МПа

С целью устранения этой условности в [9] предложены и частично исследованы более удобные, на наш взгляд, чем K_z , коэффициенты чувствительности сплава ЖС-6КП к количеству z прерываний нагружения.

Так, рассмотрены коэффициенты чувствительности материала к прерыванию нагружения K_z^t по критерию уменьшения времени до разрушения t_{pz} по сравнению с t_p

$$K_z^t = \frac{t_{pz}}{t_p} \quad (9)$$

и по критерию изменения угла наклона $\varphi = \arctg \frac{1}{m}$

или $\varphi_z = \arctg \frac{1}{m_z}$ (рис. 1), а именно:

$$K_z^m = \frac{m_z}{m} \quad (10)$$

Как показано на рис. 6, зависимости коэффициента чувствительности K_z^t от σ_{max} еще более значительны, чем для K_z . В то же время для коэффициента чувствительности K_z^m она отсутствует по определению, что следует, например, из рис. 1 и 5.

Безусловно, перспективным является коэффициент влияния прерываний K_z^m , который по определению не зависит от величины σ_{max} . Однако его использование в приложениях, в частности, в предложенном методе [1], требуют проведения дополнительных исследований.

Учитывая, что в основе всех реальных вариантов экспериментального построения моделей ПСУ фактически лежат прямые измерения значений t_p и t_{pz} , использование коэффициента влияния прерываний K_z^t при обязательном учете влияния на него σ_{max} признано предпочтительным.

3.3. Расчет отдельных точек экспериментальной модели МЦУ сплава ЖС-6КП с учетом выдержек τ_B в цикле по опытным данным [6,7]

На рисунке 4 приведены экспериментальные кривые долговечности сплава для $i=1,2,3$ значений выдержек τ_B в цикле нагружения ($1 - \tau_B=0,5$ мин, $2 - \tau_B=5$ мин, $3 - \tau_B=60$ мин). Каждая из них построена для трех различных величин $\sigma_{max ij}$. ($j=1,2,3$). Каждому из $i \times j=9$ значений напряжений $\sigma_{max ij}$ соответствует свое значение числа циклов $Z_{p ij}$ до разрушения, величину которого рассчитываем **непосредственно** по экспериментальным данным в следующей последовательности:

– по вытекающей из (6) формуле

$$\lg t_{pz ij} = \frac{1}{B_i} (\sigma_{max ij} - A_i),$$

рассчитываем $i \times j=9$ значений времен до разрушения t_{pz} для $i=3$ значений выдержек τ_B и $j=3$ значений $\sigma_{max ij}$; – количество циклов до разрушения $Z_{p ij}$, соответствующее i -ой выдержке и ij -ому напряжению σ_{max} рассчитывается по следующей формуле

$$Z_{p ij} = \frac{t_{p ij}}{t_{ци i}},$$

где $t_{ци i} = \tau_{Bi} + 0,5$ мин .

Таким образом, по приведенным выше формулам и моделям долговечности (рис. 4) **исключительно по экспериментальным данным** [6, 7] рассчитаны $i \times j=9$ значения точек для трех фрагментов экспериментальной МЦУ (рис. 7) с выдержками τ_B .

4. Построение расчетных моделей МЦУ сплава ЖС-6КП с выдержками τ_B в цикле нагружения

Целью раздела является построение расчетных моделей МЦУ сплава ЖС-6КП с помощью предлагаемого метода [1] для сравнения их с полученными выше соответствующими точками, полученными в разделе 3.3.

Рассматривались два варианта метода. **Первый вариант** использует приведенные в разделе 2.1 традиционные закономерности ПСУ с коэффициентом K_z чувствительности материала к прерываниям нагружения напряжения σ_{max} при условии его независимости от σ_{max} . **Второй вариант** использует альтернативный коэффициент $K_z^t = K_z^t(z, \sigma_{max})$ чувствительности к прерыванию, реализующий критерий уменьшения времени до разрушения образца (9).

При этом оба коэффициента чувствительности материала к прерыванию нагружения K_z и K_z^t для сплава ЖС-6КП при $T_{max}=1000^\circ\text{C}$ найдены непосредственно из экспериментальных данных [6, 7] и приведены на рис. 6. Одна из двумерных аппроксимаций K_z^t , использованная в варианте 2 метода, приведена на рис. 7.

Используемое для построения расчетных кривых МЦУ с выдержками в цикле для сплава ЖС-6КП уравнение суммирования повреждений (6) для **первого варианта** остается без изменений, а для **второго варианта**, с учетом определения (9), принимает вид:

$$\Pi_\Sigma = \frac{Z_{p\Sigma} \cdot (\sigma_{max})^{M_i(T)}}{C_i(T)} + \frac{Z_{p\Sigma} \cdot \tau_B \cdot (\sigma_{max})^{m_i(T)}}{A(T) \cdot (k_2 - k_1 \lg Z_{p\Sigma})^{m(T)}} \geq 1 \quad (12)$$

и

$$P_{\Sigma} = \frac{z_{p\Sigma} \cdot (\sigma_{\max})^{M_1(T)}}{C_1(T)} + \frac{z_{p\Sigma} \cdot \tau_B \cdot (\sigma_{\max})^{m_1(T)}}{A(T) \cdot K_z^t(z, \sigma_{\max})} \geq 1, \quad (13)$$

где $M_1(T)$ и $C_1(T)$ – параметры общеизвестной модели МЦУ $\sigma_{\max}^{M_1(T)} \cdot z_p = C_1(T)$. z_p – количество трехугольных циклов до разрушения;

$i=1, 2$ – показывает наличие двух участков кривой МЦУ с перегибом вблизи $z=1 \cdot 10^3$ циклов;

k_1, k_2 – параметры аппроксимации коэффициента K_z , в соответствии с формулой (5);

$m(T), A(T)$ – параметры исходной модели ДП материала типа (2);

$K_z^t(z, \sigma_{\max})$ – двумерная аппроксимация коэффициента чувствительности к прерыванию нагружения сплава ЖС-6КП при $T_{\max}=1000^\circ\text{C}$ (рис. 7).

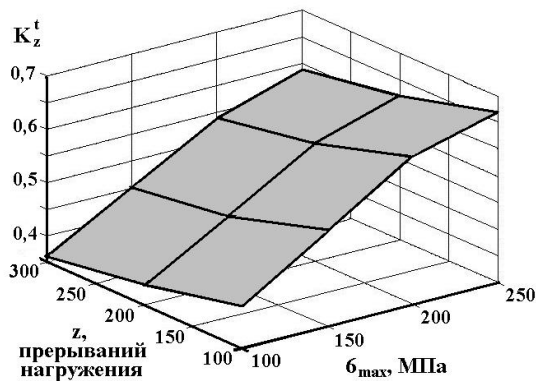


Рис. 7. Двумерная кусочно-линейная аппроксимация коэффициента чувствительности сплава ЖС-6КП

$K_z^t = K_z^t(z, \sigma_{\max})$, построенная по экспериментальным данным, приведенным на рис. 6

Численные значения коэффициентов уравнений (12) и (13) для сплава ЖС-6КП при $T_{\max}=1000^\circ\text{C}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2
Значения коэффициентов уравнений (12) и (13)

$m(T)$	$A(T)$	$\frac{M_1(T)}{M_2(T)}$	$\frac{C_1(T)}{C_2(T)}$	$\frac{k_1}{k_2}$
3,78	$4,3 \cdot 10^9$	$\frac{8,32}{14,1}$	$\frac{5,41 \cdot 10^{22}}{3,95 \cdot 10^{36}}$	$\frac{0,0891}{0,9784}$

Решение нелинейных уравнений (12) и (13), указанным в разделе 2.2 способом, позволили получить расчетные модели МЦУ для сплава ЖС-6КП с различными выдержками τ_B в цикле нагружения для указанных выше двух вариантов предлагаемого метода [1], которые приведены на рис. 8. На рисунке 8 также приведены истинные экспериментальные зна-

чения отдельных точек МЦУ, определенные в разделе 3.3.

Качественный анализ данных рис. 8 позволяет, по нашему мнению, констатировать большую близость к экспериментальным точкам расчетного варианта 2 МЦУ, построенного с помощью коэффициента K_z^t чувствительности сплава ЖС-6КП к прерываниям нагружения (9) с учетом его зависимости от σ_{\max} (рис. 7).

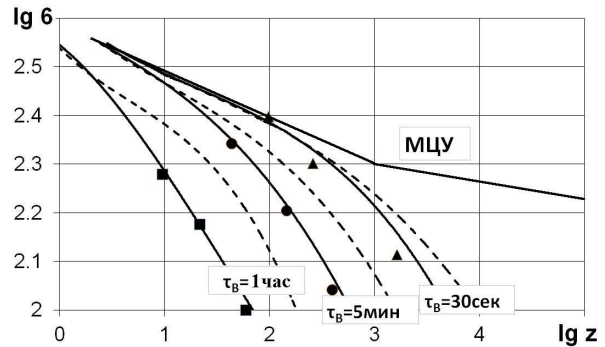


Рис. 8. Расчетные модели МЦУ сплава ЖС-6КП с выдержками τ_B в цикле нагружения, построенные с помощью предложенного метода [8] для двух вариантов функции чувствительности сплава к прерыванию нагружения: $K_z = K_z(z, T_{\max})$ при $\sigma_{\max} = \text{const}$ (пунктир) и $K_z^t = K_z^t(\sigma_{\max}, T_{\max}, z)$ (сплошная линия) с нанесенными точками экспериментальной модели МЦУ

Предложенный метод учета влияния выдержек τ_B в цикле нагружения на МЦУ материала, помимо построения моделей ПСУ и МЦУ, позволяет проводить количественный анализ механизма разрушения материала: отдельно определить зависящие от $z_{p\Sigma}$ и σ_{\max} доли выработки ресурса материала $P_{\text{МЦУ}}$, и $P_{\text{ПСУ}}$, вызываемые указанными двумя составляющими нагружения (рис. 1) при различных τ_B , выражаемыми первыми и вторыми членами уравнений (12) и (13), соответственно.

Такая информация для рассматриваемого сплава ЖС-6КП при 1000°C приведена на рис. 9, из которого очевидны качественные смещения области превалирования разрушения от МЦУ в сторону больших σ_{\max} , меньших $z_{p\Sigma}$ и τ_B , а области превалирования разрушения от ПСН – в сторону меньших σ_{\max} , больших $z_{p\Sigma}$ и τ_B (последние два фактора определяют время ДСН материала с прерыванием нагружений $t_{pz} = z_{p\Sigma} \cdot \tau_B$). При необходимости этот механизм может быть рассмотрен на количественном уровне.

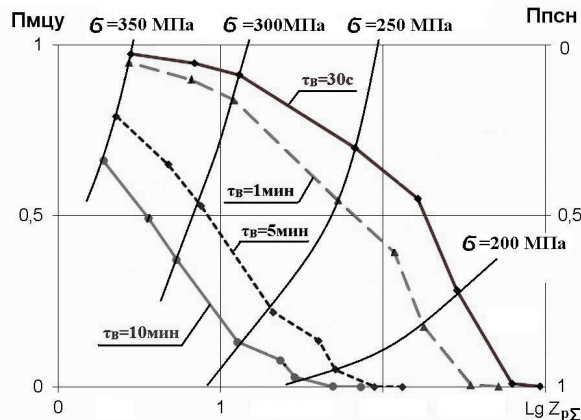


Рис. 9. Зависимости повреждаемостей $P_{МЦУ}$ и $P_{ПСН}$ сплава ЖС-6КП при $T=1000^{\circ}\text{C}$ от количества циклов или прерываний нагружения $Z_{p\Sigma}$, величины прерываемого напряжения σ_{max} и выдержки τ_b на максимальном режиме цикла

Заключение

По результатам проведенных исследований можно констатировать, что поставленные перед ними задачи, в основном выполнены. В частности:

1. Построенные исключительно по экспериментальным данным [6,7] модели ПСУ сплава ЖС-6КП с учетом выдержек в цикле нагружения позволили уточнить известные закономерности ПСУ (раздел 2.1) и предложить альтернативные более универсальные коэффициенты чувствительности материала к прерыванию нагружений.

2. По результатам п.1 внесены соответствующие изменения в алгоритм предложенного в [1] метода учета выдержек τ_b на максимальном режиме цикла нагружения материала и циклическую долговечность.

3. Сравнение расчетных и экспериментальных по данным [6, 7] моделей МЦУ сплава ЖС-6КП с учетом выдержек позволило рекомендовать для применения в предложенном методе [1] коэффициент чувствительности к прерыванию нагружения K_z^t , используя при этом двумерную его аппроксимацию по величинам z и σ_{max} . Отметим также, что для экспериментального построения K_z^t достаточно прямое определение двух величин – t_p и t_{pz} .

4. Определенная ограниченность приведенных выше выводов и рекомендаций связана с ограниченностью информации, как по номенклатуре исследованных материалов, так и по объему экспериментальных данных [6, 7] для сплава ЖС-6КП, что вызывает необходимость проведения дальнейших исследований проблемы.

Литература

1. Симбирский, Д. Ф. Модельные исследования влияния выдержек в цикле на сопротивление материала малоциклового усталости с использованием закономерностей повторно-статического нагружения [Текст] / Д. Ф. Симбирский, А. А. Брунак // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 9(106). – С. 166-172.
2. Цейтлин, В. И. Оценка прочности деталей в условиях многокомпонентного нагружения [Текст] / В. И. Цейтлин // *Проектирование и доводка авиационных ГТД : сб. тр.* – Куйбышев, 1974. – Вып. 67. – 120 с.
3. Кузнецов, Н. Д. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей [Текст] / Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин. – М. : Машиностроение, 1976. – 216 с.
4. Цейтлин, В. И. Оценка циклической долговечности деталей, работающих при сложных программах нагружения [Текст] / В. И. Цейтлин, Д. Г. Федорченко // *Проблемы прочности*. – 1983. – № 2. – С. 13-19.
5. Ануров, Ю. М. Основы обеспечения прочностной надежности авиационных двигателей и силовых установок [Текст] / Ю. М. Ануров, Д. Г. Федорченко. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2004. – 390 с.
6. Иваненко, В. А. Исследование долговечности деформированного лопаточного сплава ЖС6КП при повторном статическом нагружении [Текст] / В. А. Иваненко // *Эксплуатационная надежность авиационных газотурбинных двигателей : Межвуз. сб. науч. тр.* – К. : КИИГА, 1981. – С. 40-44.
7. Лоцицкий, Л. П. Результаты исследования долговечности жаропрочных материалов при повторном статическом нагружении [Текст] / Л. П. Лоцицкий, А. Н. Ветров, В. А. Иваненко // *Проблемы прочности*. – 1982. – № 9. – С. 15-20.
8. Симбирский, Д. Ф. К вопросу верификации метода учета влияния выдержек в цикле на сопротивление жаропрочных материалов малоциклового усталости [Текст] / Д. Ф. Симбирский, А. А. Брунак // *Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении : тез. докл. 5-й Междунар. науч.-тех. конф. (Киев 23-30 мая 2014)*. – К. : ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2014. – С. 227-228.
9. Симбирский, Д. Ф. Чувствительность сплава ЖС-6КП к повторности длительных статических нагружений при повышенных температурах [Текст] / Д. Ф. Симбирский, А. А. Брунак // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 7(114). – С. 125-130.

Поступила в редакцию 25.05.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. Конструкции авиационных двигателей С. В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ВПЛИВ ВИТРИМОК В ЦИКЛІ НАВАНТАЖЕННЯ ЗРАЗКІВ ІЗ СПЛАВУ ЖС-6КП НА ЇХ ОПІР МАЛОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ

Д. Ф. Симбірський, А. О. Брунак

Розглянуто та експериментально для прикладу сплаву ЖС-6КП при робочій температурі 1000°С підхід до підвищення ефективності розробленого методу врахування впливу витримок на максимальних режимах циклічного навантаження зразків сплаву при їх випробуваннях на опір малоциклової втоми (МЦВ). Підхід засновано на уточненні відомих закономірностей повторно-статичної втоми матеріалу з питання використання альтернативних загальноприйнятих коефіцієнтів чутливості матеріалу до кількості переривань навантаження. Ефективність підходу підтверджується порівнянням розрахункових і експериментально отриманих моделей МЦВ зазначеного матеріалу в умовах витримок на максимальних режимах його циклічного навантаження.

Ключові слова: повторно-статична втома, малоциклова втома, експериментальне підтвердження, витримки в циклі навантаження, сплав ЖС-6КП.

THE IMPACT OF HOLDS, PRESENT IN LOADING CYCLE ON ЖС-6КП ALLOY ABILITY TO STAND LOW CYCLE FATIGUE

D. F. Simbirskij, A. A. Brunak

The paper addresses the proposals for improving the method of considering holds impact on low cycle fatigue at maximum loading modes. The effectiveness of proposals was experimentally validated for ЖС-6КП samples (T=1000°С). Authors specify known regularities of repeated-static fatigue of material by introducing new sensitivity coefficients. The alternative to known sensitivity coefficients consider the way number of interrupted loadings affect the low cycle fatigue. The efficiency of the proposals was validated by comparing analytical and experimental LCF models for the considered material. The validation was performed for cyclic loading with holds at maximum modes.

Keywords: repeated-static fatigue, low cycle fatigue, experimental validation, holds in loading cycle, ЖС-6КП alloy.

Симбірський Дмитрій Федорович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. конструкції авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: aedlab@gmail.com.

Брунак Андрей Александрович – аспірант каф. конструкції авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: aedlab@gmail.com.