

УДК 621.452.3:669.018.44:539.431

Д. Ф. СИМБИРСКИЙ, А. А. БРУНАК

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

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СПЛАВА ЖС-6КП К ПОВТОРНОСТИ ДЛИТЕЛЬНЫХ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Приводятся результаты исследований закономерностей повторно-статической усталости (ПСУ) сплава ЖС-6КП при повышенной температуре. Построены модели ПСУ в соответствии с традиционным подходом к ПСУ и на основании опытных данных, что позволило выявить некоторые несоответствия. Анализируется традиционный и вновь предлагаемые коэффициенты влияния прерываний, в результате чего для устранения вышеуказанных несоответствий рекомендуется использовать коэффициент влияния прерываний по времени до разрушения при условии уточнения влияния на него максимального напряжения, так как он использует непосредственно измеряемую при экспериментах информацию.

Ключевые слова: повторно-статическая усталость (ПСУ), коэффициенты чувствительности материала к ПСУ, экспериментальное уточнение закономерностей ПСУ.

1. Постановка задачи

К числу основных видов нагружения, вырабатывающих ресурсы или, как принято формулировать, – повреждающих детали авиационных ГТД за время протекания полетных циклов, относятся: длительные статические при повышенной температуре (ДСН), циклические мало- и многоцикловые, а также повторно-статические (МЦН, МнЦН и ПСН соответственно). При указанных нагружениях проявляются такие свойства материалов, как ползучесть и длительная прочность (ДП), сопротивление малоциклового, многоциклового и повторно-статической усталости – МЦУ, МнЦУ и ПСУ соответственно [1].

При этом необходимо отметить, что за последние десятилетия возрос интерес к исследованиям и использованию закономерностей ПСН, которое в значительной степени затрагивает вопросы как отнулевого МЦН в качестве прямого аналога ПСН, так и ДСН, которое в реальных условиях многократного прерывания нагружения также может быть отнесено к ПСН.

В частности, закономерности ПСН используются в предложенном нами методе учета взаимного влияния ПСУ и МЦУ или, что тоже, влияния выдержек на максимальном режиме реальных отнулевых циклов нагружения авиационных ГТД на сопротивление материала их деталей МЦУ [2]. Для экспериментального подтверждения предложенного метода были, помимо прочего, использованы данные достаточно представительных испытаний жаропрочного сплава ЖС-6КП на его сопротивление

МЦУ при наличии выдержек в цикле [3, 4]. Сравнению результатов, которые были признаны положительными, подлежали расчетные и экспериментальные предельные кривые МЦУ сплава ЖС-6КП при наличии выдержек в цикле [5].

В связи с вышеизложенным, задачами настоящего исследования является дальнейшее использование опытных данных [3, 4] для экспериментального подтверждения уточнения закономерностей ПСУ сплава ЖС-6КП, а также технологии построения моделей последней.

2. Закономерности ПСУ [6-9]

Понятие ПСН как распространенной формы отнулевого циклического нагружения было сформулировано в трудах Р. М. Шнейдеровича, Н. И. Марина, И. А. Биргера и ряда других исследователей, а основные закономерности ПСН в современном представлении были предложены, исследованы и внедрены в работах В. И. Цейтлина, Н. Д. Кузнецова, Д. Г. Федорченко, Ю. М. Анурова, М. Е. Колотникова и других [6-9]. В их основу положено предложенное В. И. Цейтлиным понятие **коэффициента чувствительности материала K_z к количеству z повторных нагружений** статическим напряжением σ (при повышенных температурах) или, что тоже, прерываний такого нагружения [6]. 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 [2] было 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 рис. 1 приведены геометрические представления, поясняющие физический смысл формулы (1) и ее составляющих.

В работах [6, 7] 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 [6, 7] для построения модели ПСУ (рис. 1) используют зависимость (2) с таким же значением параметра $m(T)$, а также полагают независимость $m(T)$ от величины приложенного напряжения $\sigma(T, t_p) = \sigma_z[T, t_{pz}]$.

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 [6-9], может быть аппроксимирована

линейной полулогарифмической зависимостью типа:

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

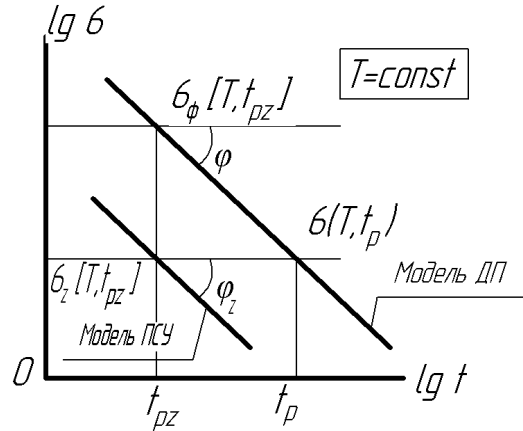


Рис. 1. Взаимное расположение исходной модели ДП ($z=1$) и модели ПСУ при $z > 1$

На рис. 2 в качестве иллюстрации приведены известные экспериментальные зависимости K_z от z .

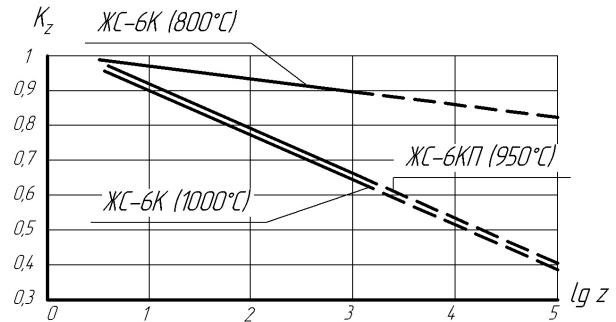


Рис. 2. Зависимости коэффициента K_z от количества прерываний нагружений z для сплавов ЖС-6К и ЖС-6КП

Приведенные выше закономерности ПСУ были использованы в предложенном нами методе учета влияния выдержек в цикле нагружения материала на его МЦУ [2]. Один из этапов верификации метода заключался в проведении сравнения, которое было признано положительным [5], полученных с его помощью расчетных кривых МЦУ сплава ЖС-6КП при наличии выдержек в цикле нагружения с кривыми МЦУ, полученными на основе экспериментальных данных [3, 4].

В настоящем исследовании на основе углубленной обработки опытных данных [3, 4] решается задача экспериментального подтверждения и уточнения приведенных выше закономерностей ПСУ.

3. Исходные экспериментальные данные для сплава ЖС-6КП

Экспериментальные данные [3,4] получены при испытаниях стандартных образцов из сплава ЖС-6КП на сопротивление циклическому термомеханическому с различными выдержками τ_B в цикле при нескольких значениях максимальных напряжениях σ_{\max} и одной температуре $T_{\max}=1000^\circ\text{C}$. Испытания проводились в потоке продуктов сгорания авиационных керосиновых топлив при синхронном изменении температуры и напряжения в цикле с полной разгрузкой после выдержек τ_B при σ_{\max} и T_{\max} и охлаждением до $T_{\min}=350^\circ$. Реализация задаваемых законов изменения температуры и механического нагружения (рис. 3б) осуществлялась с помощью автоматизированной системы управления испытаниями.

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 было принято равным $t_n + t_{охл} = 0,5$ мин. На этом одном режиме по T задавались три значения выдержек τ_B : 0,5 мин, 5 мин и 60 мин, а для каждого значения 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.

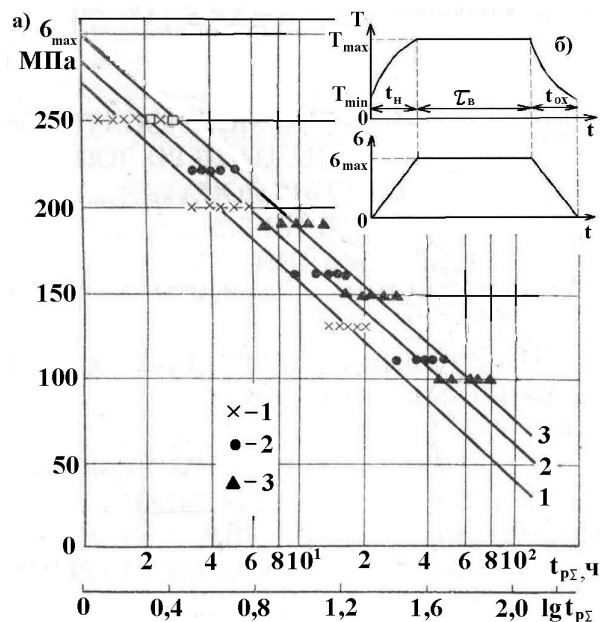


Рис. 3. Исходные экспериментальные кривые долговечности $\sigma_{\max} - t_{p\sigma}$ (а) и законы изменения σ и T (б): 1 – $\tau_B=0,5$ мин, 2 – $\tau_B=5$ мин, 3 – $\tau_B=60$ мин

По результатам статистической обработки кривые долговечности $\sigma_{\max} - t_{p\sigma}$ для трех значений τ_B (рис.3а) были аппроксимированы линейными уравнениями с логарифмическим масштабом по времени до разрушения $t_{p\sigma}$:

$$\sigma_{\max} = A + B \lg t_{p\sigma}, \quad (6)$$

где A, B – коэффициенты уравнения регрессии, полученные в [3] для указанных выше трех значений τ_B .

Трудности использования приведенных на рис.3а кривых долговечности для выяснения закономерностей ПСУ сплава ЖС-6КП при наличии выдержек τ_B в цикле нагружения заключались в том, что экспериментальные данные [3, 4] предназначались для подтверждения принципиальной зависимости времени до разрушения образцов t_{pz} от величин выдержек, а также для выяснения некоторых других вопросов, напрямую не связанных с приведенными в разделе 2 закономерностями ПСУ.

4. Обработка исходных данных и анализ полученных результатов

4.1. Построение кривых ПСУ сплава ЖС-6КП

Определяющим этапом обработки являлось построение моделей ПСУ для трех значений $z=100$; 200 и 300 прерываний нагружения, каждое из которых включает по три значения $\tau_B=0,5$ мин; 5 мин и 60 мин, то есть всего девять точек « $\sigma_{\max} - t_p$ », вычисления по которым приведены в таблице 1. В них учитывается длительность $t_{ц}$ цикла нагружения образцов, определяемая по формуле:

$$t_{ц} = \tau_B + 30\text{сек}, \quad (7)$$

включающей кроме выдержки τ_B время процесса нагрев-охлаждение образцов, принятое для всех опытов равным 0,5 мин или $8,33 \cdot 10^{-3}$ часа.

В таблице 1 реализован следующий порядок вычислений по каждой из девяти точек: например, задаемся значениями z^* и τ_B^* и по (7) определяем длительность цикла $t_{ц}^*$, а затем суммарную продолжительность нагружения $t_{p\sigma}^* = t_{ц} \cdot z^*$ – координату соответствующей τ_B кривой долговечности (рис. 3а). Далее по формуле (6) находим величину σ_{\max}^* и после определения соответствующей ей величины $t_{pz}^* = z^* \cdot \tau_B^*$ – точку на кривой ПСУ, соответствующую z^* и τ_B^* .

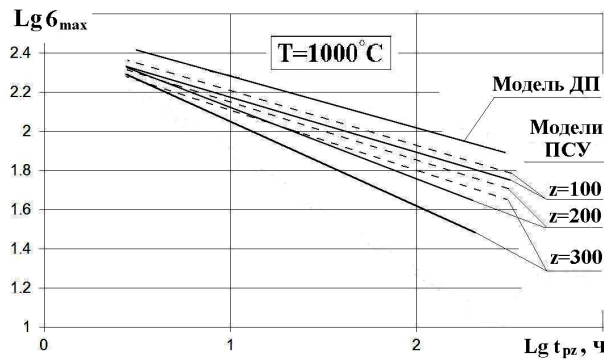


Рис. 4. Исходная кривая ДП и экспериментальные кривые ПСУ сплава ЖС-6КП для различных значений z. Пунктирные линии – кривые ПСУ, построенные при условии независимости K_z от σ_{max}

На рис. 4 для рабочей температуры T_{max}=1000°C приведены исходная модель ДП сплава ЖС-6КП и построенные по экспериментальным данным [3, 4] модели ПСУ для трех значений z. Последние были получены путем статистической обработки данных расчетов таблицы 1 при их линейной аппроксимации 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.

Необходимо отметить, что приведенная выше технология построения моделей ПСУ сплава ЖС-6КП использует только экспериментальные данные [3, 4].

Далее по экспериментальным кривым ПСУ будут непосредственно построены зависимости K_z от z и некоторых других факторов, что позволит провес-

ти некоторое детальное исследование их основных особенностей.

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

Качественный анализ взаимного расположения моделей ДП и полученных ПСУ сплава ЖС-6КП 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} нами были использованы аппроксимации z-товых моделей ПСУ типа (8), коэффициенты m_z и A_z которых приведены в таблице 1. На рис. 5 полученные на их основе величины K_z = K_z(T, z, σ_{max}) приведены для четырех значений σ_{max}, из которых следует существенный разброс коэффициента K_z по σ_{max}. Для устранения влияния нами был проведен поиск более удобного, чем K_z, коэффициента чувствительности к количеству z прерываний нагружения.

Так, были дополнительно рассмотрены коэффициенты влияния прерываний нагружения 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

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

Таблица 1

Исходные расчетные данные для построения моделей ПСУ (рис. 4)

Z, ЦИКЛОВ	τ _B , Ч	t _ц , Ч	t _{pΣ} , Ч	σ _{max} =A-B·lg t _{pΣ}	t _{pz} =Z· τ _B	m _z	lgA _z
100	0,0083	0,017	1,7	248,5	0,83	3,55	8,72
200			3,4	213,8	1,66	2,74	6,82
300			5,1	193,5	2,49	2,42	5,98
100	0,083	0,092	9,2	178,1	8,3	3,55	8,72
200			18,4	144,1	16,6	2,74	6,82
300			27,6	124,3	24,9	2,42	5,98
100	1	1,0083	100,8	73,2	100	3,55	8,72
200			201,7	39	200	2,74	6,82
300			302,5	19	300	2,42	5,98

Зависимости коэффициента чувствительности K_z^t от σ_{\max} , также приведенные на рис. 5, 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 4.

Безусловно, перспективным является коэффициент влияния прерываний K_z^m , который по определению не зависит от величины σ_{\max} . Однако трудности технологии его использования в приложениях закономерностей ПСУ, в частности, в предложенном нами методе влияния ПСН на МЦУ, требуют проведения дополнительных исследований.

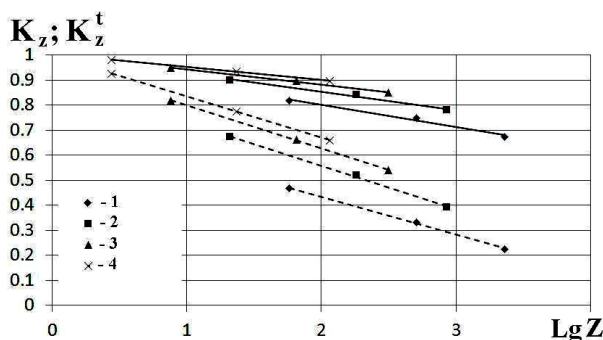


Рис. 5. Коэффициенты чувствительности сплава ЖС-6КП к прерыванию нагружения.

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

Заключение

1. На основании использования опытных данных [3, 4] для сплава ЖС-6КП при температуре $T_{\max}=1000^\circ\text{C}$ построены экспериментальные модели ПСУ для некоторых значений количества z прерываний ДСН. При построении моделей ПСУ преимущественно использовались экспериментальные данные [3, 4] за исключением справочных данных по исходной кривой ДП сплава ЖС-6КП, что дало основание для объективных оценок традиционных закономерностей ПСУ применительно к сплаву ЖС-6КП и некоторых его уточнений.

2. Традиционное использование в качестве основного фактора ПСУ коэффициента чувствительности материала K_z к прерыванию нагружений вызывает некоторые сложности из-за участия в его определении понятия «фиктивного напряжения» $\sigma_{\text{ф}}[t, t_{\text{pz}}]$, а также из-за экспериментально обнаруженной зависимости K_z от величины напряжения σ_{\max} . Последняя особенность присуща также предложенному нами коэффициенту

влияния прерываний K_z^t по критерию уменьшения времени до разрушения t_{pz} сравнительно с t_p .

3. Так как в основе всех реальных вариантов построения моделей ПСУ лежат прямые измерения значений t_p и t_{pz} , то использование коэффициента влияния прерываний K_z^t при условии уточнения влияния на него σ_{\max} представляется нам предпочтительным. Тем более что между всеми приведенными выше коэффициентами влияния прерываний существует прямая связь, в частности, исходя из (4), $K_z^t = (K_z)^m$.

4. В целом при определении всех коэффициентов чувствительности к прерыванию нагружения нам представляется оптимальным аппроксимация z -овых моделей ПСУ в форме (8) на основании прямых измерений t_p и t_{pz} .

5. Некоторая ограниченность приведенных выше выводов и рекомендаций связаны с ограниченностью информации, как по номенклатуре исследованных материалов, так и по объему экспериментальных данных [3, 4] для сплава ЖС-6КП, что доказывает необходимость проведения дальнейших исследований проблемы.

Литература

1. Колотников, М. Е. Предельное состояние и прогнозирование ресурса ГТД в условиях многокомпонентного нагружения [Текст] / М. Е. Колотников / под ред. д.т.н., проф. В. М. Чепкина. – Рыбинск : Изд-во РГАТА, 2003. –136 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. Цейтлин, В. И. Оценка прочности деталей в условиях многокомпонентного нагружения [Текст] / В. И. Цейтлин // Проектирование и доводка авиационных ГТД. – Куйбышев, 1974. – Вып. 67. – 120 с.

7. Кузнецов, Н. Д. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей [Текст] / Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.

8. 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.

9. 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.

Поступила в редакцию 20.05.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

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

ЧУТЛИВІСТЬ СПЛАВУ ЖС-6КП ДО ПОВТОРНОСТІ ТРИВАЛИХ СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Д. Ф. Симбірський, А. О. Брунак

Наводяться результати досліджень закономірностей повторно-статичної втоми (ПСТВ) сплаву ЖС-6КП при підвищеній температурі. Побудовано моделі ПСТВ згідно з традиційним підходом до ПСТВ і на основі експериментальних даних, що дозволило виявити деякі невідповідності. Аналізується традиційний і запропоновано коефіцієнти впливу переривань, в результаті чого для усунення зазначених невідповідностей рекомендується використовувати коефіцієнт впливу переривань по часу до руйнування за умови уточнення впливу на нього максимального навантаження, так як він використовує безпосередньо вимірювані при експериментах параметри.

Ключові слова: повторно-статична втома (ПСТВ), коефіцієнти чутливості матеріалу до ПСТВ, експериментальне уточнення закономірностей ПСТВ.

ЖС-6КП ALLOY SENSITIVITY TO REPETITION OF CONTINUOUS STATIC LOADINGS AT HIGH TEMPERATURES

D. F. Simbirskij, A. A. Brunak

This article deals with the results of researches of repeated-static fatigue (RSF) laws for ЖС-6КП alloy at high temperatures. The RST models based on traditional theory of RSF and based on experimental data were built and these models helped to find some mismatches. Traditional and new proposed coefficients of interrupts influence were analyzed. To fix the foregoing mismatches it recommends to use coefficient of interrupts influence based on time to failure with the account the influence of maximum stress because of this coefficient uses the information directly measured in experiment.

Key words: repeated-static fatigue (RSF), material coefficients of sensitivity to RSF, experimental refinement of RST laws.

Симбірський Дмитрій Федорович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. конструкции авиационных двигателей Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Брунак Андрей Александрович – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.