

УДК 629.7.015.4

ББК 39.52

В.В. Забобин

Иркутск, Россия

КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT-20 В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Приведены данные экспериментального исследования кинетики разрушения образцов, изготовленных из листового титанового сплава VT-20, в условиях действия переменных нагрузок и повышенных температур. Получены зависимости скорости роста трещины от параметров нагружения. Предложен механизм учета влияния температуры и нестационарности нагружения на кинетику разрушения сплава VT-20.

Ключевые слова: кинетика, ползучесть, трещина, сверхзвуковой транспортный самолет, СТС, титановый сплав.

UDC 629.7.015.4

BBK 39.52

V. V. Zabobin

Irkutsk, Russia

KINETICS OF CREEP FRACTURE OF VT-20 TITANIUM PLANAR SAMPLES

The article demonstrates the results of experimental research of fracture kinetics for samples made of VT-20 titanium sheets under alternate stresses and at elevated temperatures. Dependences of crack growth rate on load parameters are obtained. The mechanism of regarding the influence of temperature and load non-stationarity on VT-20 fracture kinetics is proposed.

Keywords: kinetics, creep, crack, supersonic transport airplane, SST, titanium alloy.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования, проведенные при проектировании сверхзвукового транспортного самолета (СТС), обусловили необходимость учета особенностей поведения конструкционных материалов при действии высоких температур. Известно, что жаропрочные алюминиевые сплавы, выбранные в качестве конструкционных материалов СТС первого поколения, должны были удовлетворять следующим требованиям:

- суммарная деформация ползучести за предполагаемый срок службы не должна превышать 0,1%;
- достаривание материала при длительных нагревах должно оказывать незначительное влияние на характеристики статической прочности.

Повышенная температура вызывает различные изменения в состоянии металла: при нагреве имеет место ползучесть, релаксация напряжений, изменение структуры металла, снижение предела выносливости и пр. Однако, характер влияния температуры не всегда однозначен. Исследования характеристик усталости сплава AU-2GN (жаропрочный алюминиевый сплав типа АК4-1) показали, что температура до 175⁰С не оказывает существенного влияния на циклическую долговечность образцов, хотя другие механические характеристики этого сплава при данной температуре несколько снижаются.

Ползучесть, как определяемая температурой и временем пластическая деформация, является важным фактором, влияние которого подвергалось специальным исследованиям. Анализ результатов влияния предварительной ползучести на сопротивление усталости плоских и цилиндрических надрезанных образцов из сплава АК4-1 приведен в работах С.И. Олькина (ЦАГИ). При повышенных (130-175⁰С) температурах ползучесть может вызвать изменение усталостных характеристик под влиянием следующих факторов:

- неравномерная деформация ползучести в зоне надреза, вызывающая образование остаточных напряжений после снятия нагрузки;
- деформационное упрочнение;
- снятие остаточных технологических деформаций;
- структурные изменения деформированного материала, вызванные длительным нагревом;
- образование разрывов сплошности.

Характер влияния предварительной ползучести на сопротивление усталости плоских образцов при наличии концентратора зависит от уровня напряженности. При низких (порядка $0,3\sigma_B$) напряжениях накопление повреждений в зоне надреза происходит без значительной локальной деформации ползучести. При более высоких (порядка $0,5\sigma_B$) напряжениях накопление повреждений в процессе ползучести сопровождается большой местной пластической деформацией, что оказывает заметное влияние остаточных напряжений на усталостную долговечность.

В работах А.М. Доценко (ЦАГИ) приводятся результаты исследования влияния нагрева в течение от 1000 до 10000 часов при температурах 130, 150 и 175 °С листов АК4-1Т1 на развитие усталостной трещины при нормальной температуре. Установлено, что параметры длительного нагрева практически не влияют на скорость роста трещины, но снижают долговечность до появления трещины.

В исследованиях совместного воздействия ползучести и усталости основное внимание отведено определению закономерностей суммирования повреждений, вызванных действием ползучести при статической нагрузке и циклического нагружения при комнатной температуре. Как показывают многочисленные экспериментальные данные, при суммировании статических и усталостных повреждений имеет место существенное отклонение от линейного закона, особенно — при одинаковом вкладе статических и усталостных повреждений в процесс разрушения на стадии до образования трещины.

Закономерности роста усталостных трещин, описываемые с позиций линейной механики разрушения, в качестве силового параметра предлагают ввести коэффициент интенсивности напряжений (КИН), обозначаемый K :

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \cdot \varphi(l), \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad (1)$$

где σ – номинальное напряжение от действия силы, нагружающей образец с трещиной, МПа; l – текущее значение длины трещины, м; $\varphi(l)$ – функция, учитывающая влияние длины трещины и геометрических размеров образца.

При действии регулярной циклической нагрузки с постоянной частотой нагружения, максимального $\sigma_{\max}$ и минимального $\sigma_{\min}$ напряжений цикла, скорость роста усталостной трещины определяет размах КИН – ΔK :

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}, \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}. \quad (2)$$

Стадия установившегося развития усталостной трещины является наиболее важной с точки зрения долговечности конструкции. Зависимость скорости роста трещины от интенсивности напряжений описывается уравнением Пэриса:

$$\frac{dl}{dN} = C \Delta K^m, \quad (3)$$

где C и m – константы уравнения.

В соответствии с уравнением Пэриса (3) между значениями скорости роста трещины и размаха КИН в двойных логарифмических координатах имеется линейная зависимость, при этом константы уравнения (3) в определенной мере можно считать характеристиками материала.

Эксплуатационное нагружение конструкции СТС происходит при чередовании уровней нагрузки, т.е. имеет место нерегулярность нагружения. Установлено, что уменьшение нагрузки, либо действие кратковременной перегрузки, приводит к замедлению роста трещины по сравнению с регулярным нагружением соответствующей низкой нагрузкой. В число факторов, влияющих на величину задержки роста трещины входят:

- размах КИН на основном и перегрузочном режимах;
- коэффициент асимметрии нагрузок;

- время нагружения на перегрузочном режиме.

В ряде исследований развития усталостной трещины при нерегулярном циклическом растяжении эффект торможения роста трещины предлагается учитывать с помощью коэффициента торможения роста трещины [Воробьев, Гаврилова, 1975]:

$$C_T = e^{-\alpha X}, \quad (4)$$

где $X = \frac{\sigma^B - \sigma^H}{\sigma^H}$ - параметр нагрузки, σ^B и σ^H – максимальные напряжения цикла соответственно перегрузочного (высокой нагрузки) и регулярного (низкой нагрузки); α – коэффициент, определяемый экспериментально.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные испытания образцов, изготовленных из листов титанового сплава ВТ20 толщиной 2,0 мм в направлении вдоль проката при температурах от 20 до 360 °С по разработанной методике [Забобин, 1980] показали, что температура испытаний оказывает существенное влияние на долговечность образца, выраженную в числе циклов нагружения, как на стадии до появления трещины, так и на стадии развития её до некоторой обусловленной длины.

Для определения зависимости скорости роста трещины от параметров температурно-силового нагружения получены значения параметров уравнения Пэриса (3) C_1 и m_1 . Обработка экспериментальных данных позволила установить степенной вид зависимости параметра m_1 от температуры испытания:

$$m_1 = 2,246 (T^0C)^{-0,03} \quad (5)$$

Графически линейный вид зависимости (5) в логарифмических координатах позволил определить коэффициент линейной корреляции $r_k = 0,987$.

Зависимость параметра C_1 от температуры испытания близка к линейной (коэффициент линейной корреляции $r_k = 0,998$) и описывается зависимостью:

$$C_1 = 0,0309 + 0,00016 (T^0C). \quad (6)$$

Таким образом, в исследованном диапазоне температур при различных значениях размаха КИН скорость роста трещины можно представить в виде:

$$\frac{dl}{dN} = [0,0309 + 0,00016(T^{\circ}C)]\chi K^{2,246} (T^{\circ}C)^{-0,03} \quad (7)$$

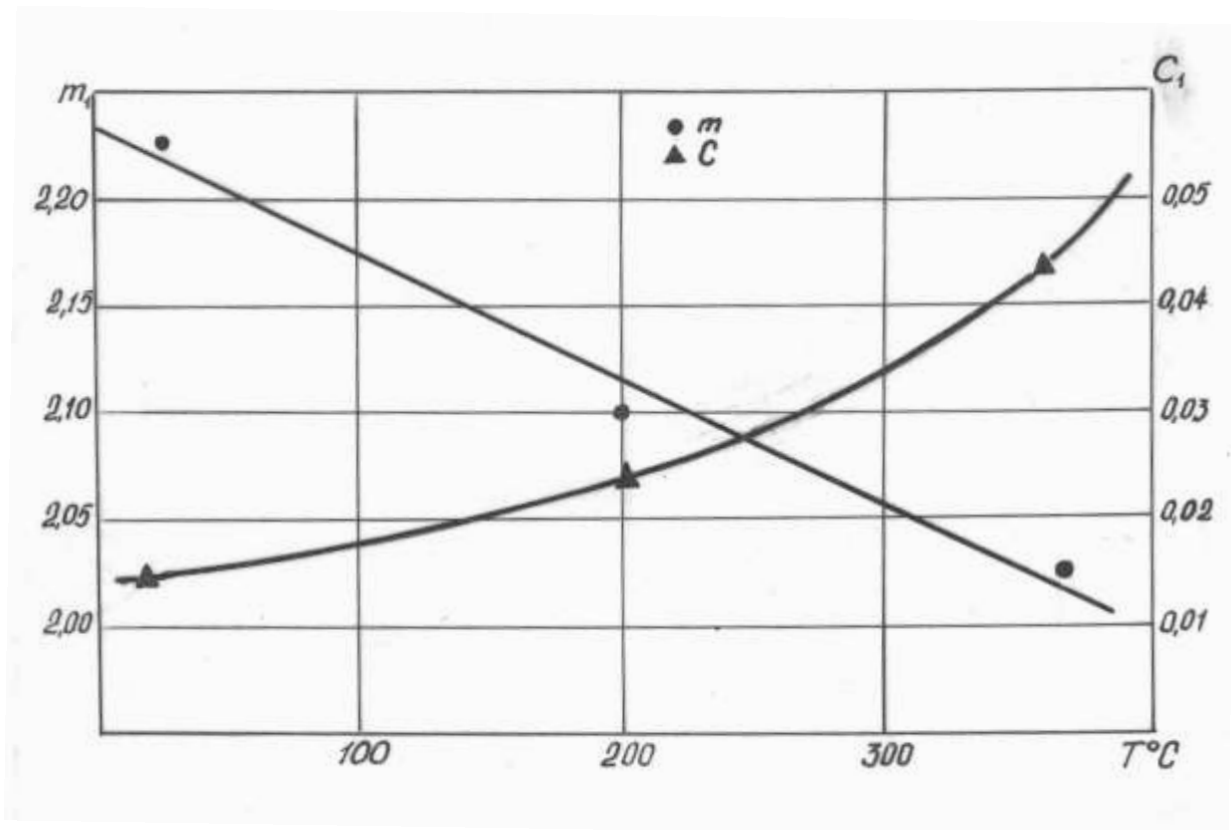


Рисунок 1. Зависимость параметров уравнения Пэриса C_1 и m от температуры испытания.

Испытания образцов нерегулярной циклической нагрузкой позволили получить значения коэффициента торможения для различных значений длины трещины. Установлено, что значение длины трещины в момент перехода с высокого уровня нагрузки на низкий не оказывает влияния на значения C_T :

$$C_T = \frac{\left(\frac{dl}{dN}\right)_3}{\left(\frac{dl}{dN}\right)_0} = \varphi(\chi, T^{\circ}C, \chi l), \quad (8)$$

где $\left(\frac{dl}{dN}\right)_3$ – скорость роста трещины, замедленная действием нагрузки высокого уровня; $\left(\frac{dl}{dN}\right)_0$ – скорость роста трещины при действии регулярной нагрузки низкого уровня; $\chi = \frac{\sigma^B - \sigma^H}{\sigma^H}$ – параметр нагружения, характеризующий соотношение высокой и низкой нагрузок в момент перехода; χl – приращение длины трещины.

Поскольку температура испытания действовала в равной степени на скорость роста трещины при регулярном нагружении и на скорость, замедленную действием нагрузки высокого уровня, то испытания не показали влияния температуры испытания на коэффициент торможения, что позволяет упростить выражение (8):

$$C_T = \varphi(X, \Delta l) \cdot (9)$$

Сопоставляя выражение (9) с ранее предложенным для определения коэффициента торможения (4), находим, что константу α можно представить в виде зависимости:

$$\alpha = \varphi(\Delta l) \cdot (10)$$

Очевидно, что значение коэффициента торможения C_T существенно зависит от приращения длины трещины с момента перехода с высокого уровня нагрузки на низкий; при том, что при некоторых значениях Δl коэффициент торможения C_T превышает единицу, т.е. наблюдается рост трещины со скоростью более высокой, чем при регулярном нагружении. Такой эффект объясняется действием остаточных напряжений сжатия в пластической области вершины трещины [Забобин, 1982]. С учетом вышеизложенного, представим зависимость (10) в виде:

$$\alpha = \frac{\beta}{\Delta l} \cdot (11)$$

Введем коэффициент Ψ^I , учитывающий ускорение развития трещины при попадании её в зону остаточных напряжений растяжения, представив зависимость (9) в виде:

$$C_T = \Psi^I e^{-\frac{\beta}{\Delta l} X}, (12)$$

где зависимость Ψ^I от X представим в виде:

$$\Psi^I = I + \Psi * X, (13)$$

$$\beta = \beta^I * X. (14)$$

Анализ экспериментальных данных показал линейный характер зависимости

$$\ln C_T = \ln \Psi - \frac{\beta^I}{\Delta l} (15)$$

для $\bar{\Delta} = 0,33; 0,5; 1,0$.

Подставив численные значения коэффициентов $\beta = 0,8303$; $\gamma = 0,4024$ в зависимость (12):

$$C_T = (1 + 0,4024\bar{\Delta}) * e^{-\frac{0,8303}{\bar{\Delta}l}\bar{\Delta}}. \quad (16)$$

При определении коэффициента торможения в тонкостенных конструкциях из ВТ20 рекомендуется использовать выражение (16), при этом значение α рекомендуется принимать из условия:

$$\alpha = \frac{0,8303}{\bar{\Delta}l} \text{ при } \bar{\Delta}l > 0,25; \quad (17)$$

$$\alpha = 3,3212 \text{ при } 0 \leq \bar{\Delta}l \leq 0,25.$$

Неточность определения коэффициента торможения с помощью (16) и (17) при $0,25\text{мм} < \bar{\Delta}l < 4,0\text{мм}$ идет в запас прочности, поскольку расчетное значение C_T больше действительного.

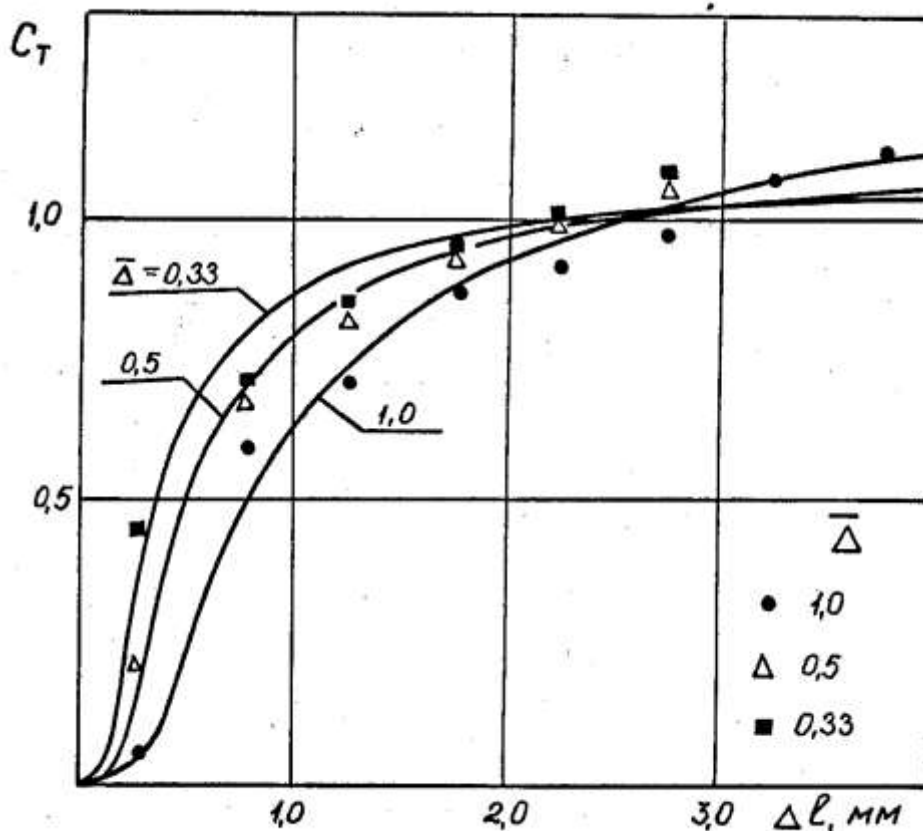


Рисунок 2. Зависимость коэффициента торможения роста усталостной трещины от величины перегрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получена зависимость (7), позволяющая оценить скорость роста усталостной трещины в образцах из титанового сплава ВТ20, которая может быть использована при определении живучести элементов конструкции, изготовленных из этого же материала, в условиях действия регулярной циклической нагрузки в диапазоне температур от 20 до 360⁰С.

2. Установлен характер влияния очередности приложения нагрузок при нерегулярном циклическом нагружении на скорость роста усталостных трещин. Получено выражение (16), позволяющее определить численное значение коэффициента торможения C_T для элемента конструкции из ВТ20, работающего в условиях нерегулярного нагружения.

Библиографический список

1. *Воробьев А.З.* О развитии усталостной трещины при нестационарном растяжении / А.З. Воробьев, Е.А. Гаврилова // Научные труды ЦАГИ. 1975. Вып. 1671. С. 3-16.
2. *Забобин В.В.* Экспериментальное исследование усталостной долговечности плоских элементов конструкции планера сверхзвукового транспортного самолета в условиях ползучести // Тезисы докладов 1 научно-технической конференции молодых ученых РКИИ ГА. Рига, 1980. С. 7.
3. *Забобин В.В.* Торможение развития трещины при нестационарном циклическом нагружении / В.В. Забобин, К.Д. Миртов // Динамика и механика поврежденных авиационных конструкций: межвуз. темат. сб. науч. тр. / Моск. ин-т инж. ГА, 1982. С. 60-64.

References

1. *Vorob'ev A.Z.* (1975). Concerning the unsteady-tension fatigue crack growth / A.Z. Vorob'ev, E.A. Gavrilova // Scientific works of TSAGI. 1975. Iss. 1671. P. 3-16. (In Russian).
2. *Zabobin V.V.* (1980). Experimental research of creep fatigue life of flat elements of a supersonic transport airframe // Abstracts of the first scientific and technical conference of young scientists at RCAII. Riga, 1980. P. 7. (In Russian).
3. *Zabobin V.V.* (1982). Crack growth retardation at unsteady cyclic load / V.V. Zabobin, K.D. Mirtov // Dynamics and mechanics of damaged aircraft constructions: interacademic subject collection of scientific works / Moscow Civil Aviation Engineers Institute, 1982. P. 60-64. (In Russian).