

УДК 539.4:620.1

## КИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

М. Г. Петров, А. И. Равикович

Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина,  
630051 Новосибирск

На основе кинетической концепции разрушения обобщены результаты исследований долговечности алюминиевых сплавов Д16 Т, АК4-1 Т1 и 1201 Т1. Долговечность исследовалась в условиях ползучести при постоянной и возрастающей нагрузках с различными скоростями и при различных температурах. Температура варьировалась в диапазоне 473–77 К, длительность испытаний составляла от долей секунды до десяти тысяч часов. Получена информация о влиянии релаксации внутренних напряжений на долговечность сплавов. Экспериментально обоснована методика определения долговечности с учетом релаксационных процессов в твердых телах.

**Введение.** В настоящее время среди различных теорий прочности материалов выделяют две основные группы: теории предельных состояний и кинетические теории разрушения, учитывающие время действия нагрузки. Теории предельных состояний соответствуют экспериментам лишь в частных случаях разрушения. В рамках кинетических теорий применяются различные критерии разрушения. На практике в зависимости от условий и характера нагружения используются различные представления о прочности материала и единицы измерения его работоспособности (время действия нагрузки, число наработанных циклов или блоков нагрузок, величина накопленной остаточной пластической деформации и т. п.).

С расширением возможностей и усложнением условий испытаний возникла необходимость объединения в рамках общего подхода решения частных задач кратковременной и длительной прочности, ползучести и усталости, термоциклической прочности. Такой подход, позволяющий по-новому рассматривать процессы разрушения и деформирования твердых тел под нагрузкой, начал разрабатываться в 50-е гг. ленинградской научной школой во главе с С. Н. Журковым. Согласно этому подходу твердое тело представляет собой физическую среду, в которой действие внешней силы зависит от взаимодействия атомов, находящихся в тепловом движении. При этом важную роль играет неравномерность теплового движения. Разрушение рассматривается как необратимый процесс накопления субмикро- и микротрещин, возникающих в результате термофлуктуационных разрывов межатомных связей в механически напряженном материале [1]. При любом виде нагружения основной характеристикой считается долговечность, т. е. время с момента приложения нагрузки до появления макропризнаков разрушения — макротрещины.

Реальные процессы деформирования и разрушения конструкционных сплавов сложны и требуют специальных теоретических и экспериментальных исследований. В данной работе представлены результаты исследования долговечности алюминиевых сплавов Д16 Т, АК4-1 Т1 и 1201 Т1, используемых в авиастроении.

**Методика эксперимента.** Согласно кинетической теории разрушения [1] при постоянных напряжениях зависимость между долговечностью  $\tau$ , действующим напряжением  $\sigma$

и абсолютной температурой  $T$  имеет вид

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (1)$$

где  $\tau_0$ ,  $U_0$ ,  $\gamma$  — коэффициенты;  $R$  — универсальная газовая постоянная. При переменных во времени напряжениях  $\sigma(t)$  долговечность определяется выражением

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp\{[U_0 - \gamma\sigma(t)]/RT\}} = 1, \quad (2)$$

при выводе которого использован принцип линейного суммирования повреждений.

В уравнениях (1) и (2) коэффициенты  $\tau_0$ ,  $U_0$  и  $\gamma$  являются физическими константами. Предэкспоненциальный множитель  $\tau_0 \approx 10^{-13}$  с характеризует период колебаний атомов в твердом теле. Коэффициент  $U_0$ , имеющий размерность энергии, связан с энергией распада межатомных связей и предполагается структурно-независимым параметром. Его называют начальной энергией активации разрушения. Структурно-зависимым параметром является коэффициент  $\gamma$ , называемый активационным объемом. Согласно [1] коэффициент  $\gamma$  связан с величиной внутренних локальных напряжений и интегрально характеризует неравномерность распределения нагрузки по атомным связям. Он определяется как произведение атомного объема на коэффициент перенапряжений в местах локального развития разрушения. Чем ниже уровень локальных перенапряжений, тем прочнее и долговечнее материал и тем меньше  $\gamma$ .

Как показано в [2–5], при исследовании долговечности различных материалов (полимеров, металлов и сплавов), а также остаточной долговечности после предварительной пластической деформации [6] одновременно с процессом разрушения происходит релаксация внутренних напряжений, о которой можно судить по изменению коэффициента  $\gamma$ , определяемого на основе механических испытаний.

Программа испытаний составлена таким образом, чтобы по возможности исследовать весь диапазон активационного объема от  $\gamma_{\min}$  до  $\gamma_{\max}$ . Например, для определения  $\gamma_{\max}$  проводились испытания при ударном нагружении, при котором релаксация внутренних напряжений не успевала произойти за время разрушения, а также при криогенной температуре, когда релаксация практически отсутствовала. Для определения промежуточных значений  $\gamma$  и  $\gamma_{\min}$  проводились испытания образцов на разрыв с различными скоростями деформирования при нормальной и повышенной температуре, а также на ползучесть при постоянной нагрузке и повышенной температуре и в условиях длительного возрастания нагрузки с постоянной скоростью при нормальной и повышенной температуре.

В экспериментах на долговечность использовались стандартные гладкие образцы в условиях одноосного растяжения. Режимы нагружения варьировались в диапазоне температуры от 473 до 77 К при длительности испытаний от долей секунды до десяти тысяч часов.

Образцы изготавливались из серийного закаленного и естественно состаренного Д16 Т (пруток и лист), серийного закаленного и искусственно состаренного АК4-1 Т1 (пруток) и сплава 1201 (плита). Катано-кованая плита сплава 1201 толщиной 80 мм после закалки и растяжения со степенью остаточной деформации 2,5% была искусственно состарена до состояния Т1.

Эксперименты при длительном действии нагрузки проводились на машинах ZSt 2/3. На этих машинах образцы испытывались в условиях ползучести при постоянных нагрузках и повышенной температуре, а также в условиях медленного ступенчатого нагружения с постоянной скоростью при нормальной и повышенной температуре. Испытания при кратковременном действии нагрузки проводились при нормальной, повышенной и криогенной

Таблица 1

Исходные данные и результаты испытаний алюминиевых сплавов  
при постоянных нагрузках (точки 3 на рис. 1–3)

Д16 Т (рис. 1)			АК4-1 Т1 (рис. 2)			1201 Т1 (рис. 3)		
$T$ , К	$\sigma_0$ , МПа	$\tau$ , с	$T$ , К	$\sigma_0$ , МПа	$\tau$ , с	$T$ , К	$\sigma_0$ , МПа	$\tau$ , с
398	420	$5,76 \cdot 10^4$	403	240	$4,73 \cdot 10^7$	398	300	$5,76 \cdot 10^5$
398	400	$2,26 \cdot 10^5$	423	240	$3,16 \cdot 10^6$	398	280	$4,83 \cdot 10^6$
423	380	$2,95 \cdot 10^4$	423	200	$3,48 \cdot 10^7$	398	260	$2,36 \cdot 10^7$
423	360	$1,29 \cdot 10^5$	423	160	$6,96 \cdot 10^7$	423	240	$1,44 \cdot 10^7$
423	340	$2,32 \cdot 10^5$	423	140	$1,04 \cdot 10^8$	433	280	$2,72 \cdot 10^4$
423	320	$3,19 \cdot 10^5$	448	240	$8,57 \cdot 10^5$	433	260	$1,22 \cdot 10^5$
423	240	$8,78 \cdot 10^6$	448	200	$5,26 \cdot 10^6$	433	250	$4,02 \cdot 10^5$
448	300	$4,20 \cdot 10^4$	448	160	$2,13 \cdot 10^7$	433	240	$1,46 \cdot 10^6$
448	240	$4,23 \cdot 10^5$	—	—	—	433	220	$1,44 \cdot 10^7$
448	200	$2,14 \cdot 10^6$	—	—	—	448	200	$1,52 \cdot 10^7$
448	160	$1,35 \cdot 10^7$	—	—	—	448	180	$4,06 \cdot 10^7$
448	140	$1,66 \cdot 10^7$	—	—	—	473	160	$1,83 \cdot 10^7$
473	180	$3,82 \cdot 10^5$	—	—	—	473	140	$4,26 \cdot 10^7$

температуре. Нагружение со скоростью, рекомендуемой ГОСТом на механические испытания, осуществлялось на гидравлической разрывной машине ГУРМ-10, дополнительно оборудованной съемными электропечью и криогенной камерой, куда впрыскивался жидкий азот. Ударное нагружение проводилось на скоростной ротационной машине СМ-10. В одинаковых режимах при ударном нагружении испытывалось до 10 образцов, в остальных случаях — 3–5 образцов. Отклонение температуры и нагрузки от заданных соответствовало требованиям ГОСТа. Начальные напряжения  $\sigma_0$  (в испытаниях при постоянной нагрузке), скорость деформирования  $\dot{\epsilon}$  и температура  $T$ , а также напряжения разрыва  $\sigma_*$  в шейке образцов, время разрушения  $\tau$  при постоянном напряжении и  $t_*$  при возрастающем с постоянной скоростью напряжении указаны в табл. 1–4 ( $\tau$ ,  $t_*$  и  $\sigma_*$  — осредненные экспериментальные значения для образцов с одинаковыми режимами испытаний).

Методика обработки экспериментальных данных, полученных при различных режимах нагружения, заключается в следующем. При испытании в условиях ползучести при постоянной нагрузке, приняв  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ , запишем (1) в виде зависимости

$$U(\sigma) = U_0 - \gamma\sigma = RT \ln(\tau/\tau_0), \quad (3)$$

Таблица 2

Исходные данные и результаты испытаний алюминиевых сплавов  
при возрастающих с постоянной скоростью нагрузках

Номера точек на рис. 1–3	Д16 Т (рис. 1)			АК4-1 Т1 (рис. 2)			1201 Т1 (рис. 3)		
	$T$ , К	$\sigma_*$ , МПа	$t_*$ , с	$T$ , К	$\sigma_*$ , МПа	$t_*$ , с	$T$ , К	$\sigma_*$ , МПа	$t_*$ , с
4	293	644	$4,53 \cdot 10^7$	293	702	$7,25 \cdot 10^6$	293	563	$9,30 \cdot 10^6$
	—	—	—	293	698	$3,71 \cdot 10^7$	293	545	$4,62 \cdot 10^7$
5	—	—	—	293	679	$1,17 \cdot 10^6$	—	—	—
	—	—	—	293	682	$3,01 \cdot 10^4$	—	—	—
6	—	—	—	373	657	$2,76 \cdot 10^4$	—	—	—

Таблица 3

Исходные данные и результаты испытаний алюминиевого сплава Д16 Т с различными скоростями деформирования  $\dot{\epsilon}$ ,  $\text{с}^{-1}$

T, К	$\dot{\epsilon} = 100$			$\dot{\epsilon} = 1,25$			$\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-3}$		
	Номера точек на рис. 1	$\sigma_*$ , МПа	$t_*$ , $10^{-3}$ с	Номера точек на рис. 1	$\sigma_*$ , МПа	$t_*$ , $10^{-1}$ с	Номера точек на рис. 1	$\sigma_*$ , МПа	$t_*$ , с
77	—	—	—	—	—	—	19	812	45
123	—	—	—	—	—	—		747	34
223	—	—	—	—	—	—	18	694	52
293	16	763	1,53	15	706	1,13	17	658	62
373	14	722	1,40	13	651	0,96	7	634	39
423		662	1,29	12	652	0,90	9	610	41
473		686	0,98	11	612	0,84	10	592	38

называемой силовой зависимостью энергии активации разрушения. При  $\tau_0 = 10^{-13}$  с и известных  $\sigma$ ,  $T$  и  $\tau$  определены значения  $U$ . Если при одних и тех же условиях экспериментов  $\gamma$  имеет постоянное значение, то зависимость  $U$ – $\sigma$  должна иметь вид прямой линии. Линия строилась на основе статистической обработки значений энергии активации разрушения по методу наименьших квадратов. Путем экстраполяции полученной прямой к оси ординат (при  $\sigma \rightarrow 0$ ) находится значение начальной энергии активации разрушения  $U_0$ , а по углу наклона прямой — значение активационного объема  $\gamma$ .

Для обработки экспериментальных данных при изменяющемся во времени напряжении используется уравнение (2). Пусть напряжение увеличивается от нуля с постоянной скоростью  $w$  до тех пор, пока в момент времени  $t_*$  не произойдет разрыв образца при напряжении  $\sigma_*$ . Подставляя в (2)  $\sigma(t) = wt$ , где  $w = \sigma_*/t_*$ , получим

Таблица 4

Исходные данные и результаты испытаний алюминиевых сплавов АК4-1 Т1 и 1201 Т1 со скоростью деформирования  $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-3}$   $\text{с}^{-1}$

T, К	Номера точек на рис. 2, 3	АК4-1 Т1 (рис. 2)		1201 Т1 (рис. 3)	
		$\sigma_*$ , МПа	$t_*$ , с	$\sigma_*$ , МПа	$t_*$ , с
77	19	741	30	720	22
77		—	—	708	37
77		—	—	701	54
123		699	52	—	—
293	17	666	21	567	232
343	8	—	—	572	195
373	7	—	—	598	204
398		—	—	576	212
448	10	—	—	521	194
473		—	—	454	178

$$B\sigma_* = -\ln \left[ At_* \frac{1 - \exp(-B\sigma_*)}{B\sigma_*} \right], \quad (4)$$

где  $A = \nu_0 \exp[-U_0/(RT)]$ ;  $B = \gamma/(RT)$ ;  $\nu_0 = 1/\tau_0$ . Произведение  $t_*[1 - \exp(-B\sigma_*)]/(B\sigma_*)$  в (4) представляет собой эквивалентное время разрушения  $\tau_*$  при постоянных напряжениях  $\sigma = \sigma_*$ . Для определения  $\tau_*$  по уравнению (4) методом последовательных приближений вычисляется  $B$  при известных из опыта  $\sigma_*$ ,  $t_*$  и  $T$ . При этом коэффициенты  $U_0$  и  $\tau_0$  имеют такие же значения, как при  $\sigma = \text{const}$ . При обработке экспериментальных данных вместо  $\tau$  и  $\sigma$  в (3) подставляют значения  $\tau_*$  и  $\sigma_*$ .

Построенные на основе обработки экспериментальных данных зависимости энергии активации разрушения от напряжения для сплавов Д16 Т, АК4-1 Т1 и 1201 Т1 приведены на рис. 1–3 соответственно. Прямые 1 и 2 соответствуют минимальному  $\gamma_{\min}$  и максимальному  $\gamma_{\max}$  значениям активационного объема. Номера экспериментальных точек на рис. 1–3 для соответствующих режимов испытаний указаны в табл. 1–4.

**Анализ результатов и обсуждение.** Из представленных зависимостей энергии активации разрушения от напряжения следует, что для исследованных сплавов не все значения  $U(\sigma)$  располагаются вблизи прямой линии. Как показано на рис. 1 для сплава Д16 Т, при режимах испытаний 3, 4, 9 и 10 значения  $U(\sigma)$  располагаются вблизи прямой 1. В этом случае разрушение происходит в условиях, способствующих развитию релаксационного процесса (длительное время испытаний или повышенная температура). Это позволяет считать, что процесс релаксации внутренних напряжений закончился раньше, чем процесс разрушения. В результате коэффициент  $\gamma$  принимает постоянное значение, близкое к  $\gamma_{\min}$ . При режимах 15, 16, 18 и 19 значения  $U(\sigma)$  группируются вблизи прямой 2. Здесь процесс разрушения происходил практически без релаксации внутренних напряжений, и коэффициент  $\gamma$  принял постоянное значение  $\gamma_{\max}$ .

В области между прямыми 1 и 2 (см. рис. 1) проявляются взаимодействие и конкуренция процессов разрушения и релаксации внутренних напряжений. В этом случае коэффициент  $\gamma$  принимает промежуточные значения в диапазоне от  $\gamma_{\min}$  до  $\gamma_{\max}$  в зависимости от условий испытаний. Такая же зависимость активационного объема  $\gamma$  от релаксационного процесса наблюдается и для сплавов АК4-1 Т1 и 1201 Т1 (см. рис. 2, 3). Значения параметров  $U_0$ ,  $\gamma_{\min}$  и  $\gamma_{\max}$  для каждого сплава приведены в табл. 5.

Выявленная на основе анализа экспериментальных данных зависимость коэффициента  $\gamma$  от релаксационного процесса позволила определить температурно-временные режимы испытаний, при которых релаксационный процесс не происходит или заканчивается

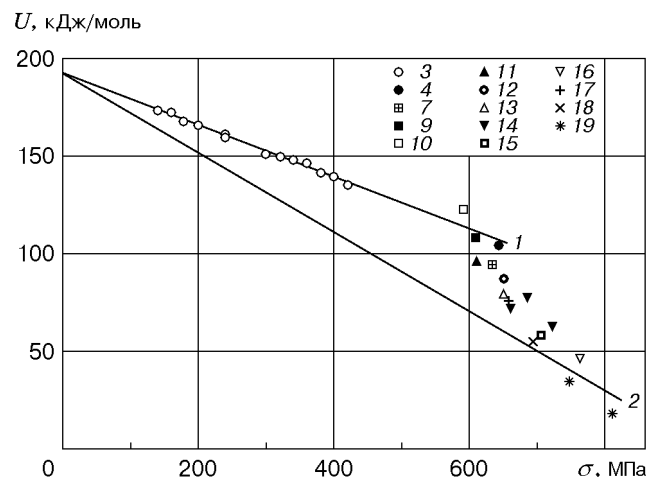


Рис. 1

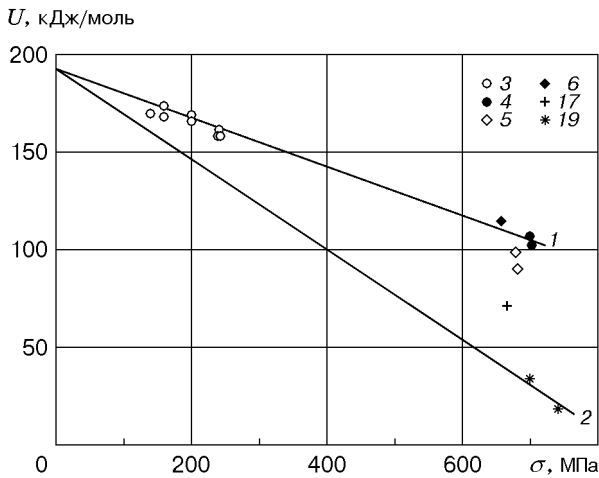


Рис. 2

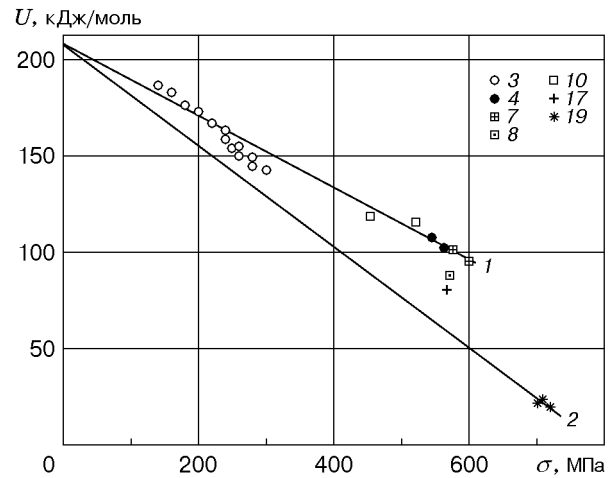


Рис. 3

раньше процесса разрушения. Знание областей, в которых  $\gamma = \text{const}$  при различных  $\sigma_*$ ,  $\tau_*$  и  $T$ , позволяет сократить объем и продолжительность экспериментов при определении параметров в уравнениях (1) и (2). Для получения общего представления о характере зависимости энергии активации разрушения сплава от напряжений достаточно провести испытания образцов при монотонном нагружении с какой-либо скоростью, изменяя для каждого образца только температуру испытаний. После этого можно легко выбрать режимы нагружения для более подробных исследований.

Согласно уравнениям (1) и (2) напряжение и температура представлены в показателе экспоненты и в равной степени влияют на долговечность. Из этих уравнений следует, что понижение температуры приводит к увеличению напряжения разрыва образца, что подтверждается экспериментальными данными (см. табл. 1–4). Увеличение скорости нагружения или деформирования также приводит к увеличению напряжения (см. табл. 3, 4) вследствие сокращения времени действия нагрузки. Так, при ударной нагрузке требуются большие напряжения, чтобы за короткое время произошел разрыв образца. Такие же закономерности характерны для напряжений течения материала, называемых “пределами текучести”. Напряжения течения могут быть определены при использовании реологических моделей [7].

В области изменения  $\gamma$  от  $\gamma_{\min}$  до  $\gamma_{\max}$ , в которой взаимодействуют процессы разрушения и релаксации внутренних напряжений, наблюдается сложная зависимость “разрушающего” напряжения от температуры и времени действия нагрузки (т. е. зависимость долговечности от напряжений и температуры). С одной стороны, увеличение времени действия нагрузки уменьшает “разрушающее” напряжение, с другой — увеличение длительности пребывания материала под нагрузкой способствует более полному протеканию релакса-

Таблица 5

Активационные параметры процесса разрушения алюминиевых сплавов

Марка сплава	$U_0$ , кДж/моль	$\gamma_{\min}$ , кДж/(моль · МПа)	$\gamma_{\max}$ , кДж/(моль · МПа)
Д16 Т	193	0,135	0,203
АК4-1 Т1	193	0,126	0,234
1201 Т1	208	0,188	0,264

ционного процесса, т. е. делает материал более прочным. Эти процессы имеют разные активационные параметры, результатом чего является более сложная зависимость  $\gamma$  от условий испытаний. В таких случаях требуются реологические модели, которые описывают структурные изменения в материале, характеризующиеся изменением активационного объема [7]. Моделирование релаксационных процессов позволяет прогнозировать долговечность материала при произвольном изменении напряжений и температуры [5, 7].

Из проведенного исследования следует, что кинетический подход к проблеме прочности позволяет проанализировать процессы, происходящие на микроуровне, и определить параметры этих процессов на основе данных механических испытаний.

Авторы выражают благодарность Ю. И. Устиновщикову за предоставленные данные испытаний при ударном нагружении, а также А. П. Кузнецову и Н. И. Жичиной за проведение значительной части испытаний на ползучесть.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Реголь В. Р., Слущер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974.
2. Разумовская И. В., Корабельников Ю. Г., Бартенев Г. М., Панферов К. В. Долговечность и релаксационные процессы в полимерах // Механика полимеров. 1969. № 4. С. 629–632.
3. Степанов В. А., Шпейзман В. В., Жога Л. В. Температурно-временная зависимость прочности твердых тел в хрупком состоянии // Физика металлов и металловедение. 1976. Т. 42, вып. 5. С. 1064–1074.
4. Петров М. Г. О некоторой зависимости между деформированием и разрушением твердых тел под нагрузкой // ПМТФ. 1976. № 6. С. 122–126.
5. Степанов В. А., Песчанская Н. Н., Шпейзман В. В. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1984.
6. Мошкин Н. А., Равикович А. И. Приложение кинетической концепции прочности к определению долговечности легких сплавов после предварительной пластической деформации // ПМТФ. 1978. № 1. С. 128–132.
7. Петров М. Г. Реологические свойства материалов с позиций физической кинетики // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 1. С. 119–128.

*Поступила в редакцию 14/XII 2000 г.,  
в окончательном варианте — 20/II 2001 г.*

---