

## ПРИЛОЖЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ ПРОЧНОСТИ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

*Н. А. Мошкин, А. И. Равикович*

*(Новосибирск)*

Остаточные пластические деформации могут возникать в элементах конструкций из легких сплавов в результате воздействия сложного комплекса эксплуатационных нагрузок (особенно в местах концентрации напряжений), а также при технологических процессах, связанных с гибкой, формовкой с обтяжкой, некоторых видах холодной штамповки и т. п.

Температурные условия и величина пластических деформаций определяют предысторию материала и могут оказывать существенное влияние на сопротивление сплава статическим и переменным нагрузкам. Экспериментально установлено, что характер влияния пластических деформаций зависит от многих факторов: состава сплава, условий и вида предварительной деформации, температурно-силового режима последующих испытаний. При этом прочностные свойства материала могут возрастать, убывать или оставаться неизменными.

Широкое применение в технике пластически деформированных материалов вызвало появление многочисленных исследований, где экспериментальным путем находится оптимальная пластическая деформация. Однако чисто экспериментальный подход обладает большой трудоемкостью и не всегда позволяет получить надежные результаты при определении степени пластической деформации, которая благоприятно сказывается на характеристиках прочности.

В данной работе проведено исследование влияния степени предварительной пластической деформации растяжением на длительную прочность дуралюмина при различных температурах и напряжениях и дана оценка возможности определения долговечности в указанных условиях на основе кинетической теории прочности.

В качестве материала для исследования был взят серийный закаленный и естественно состаренный листовой сплав Д16АТ толщиной 3 мм. Все листы брались одной плавки. Образцы вырезались вдоль проката. Механические свойства материала в исходном состоянии (за исходное принималось состояние поставки) были следующие: предел прочности  $\sigma_b = 48,6$  кг/мм<sup>2</sup>, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 36,4$  кг/мм<sup>2</sup>, относительное удлинение  $\delta = 14,3\%$ .

Определение механических характеристик и создание предварительной пластической деформации на 2, 4, 6 и 8% проводилось при комнатной температуре на гидравлической разрывной машине типа ГУРМ-10. Предварительная деформация создавалась на готовых образцах, которые после наклепа никакой механической обработке не подвергались. Благодаря специально сконструированному диаграммному прибору достигалась высокая точность при создании пластической деформации. Разброс значений для каждого уровня пластической деформации не превышал 0,01—0,03%. После предварительной деформации образцы испытывались в условиях ползучести до разрушения при температурах 125, 150, 175 и 200°C и напряжениях 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42 кг/мм<sup>2</sup>.

Испытания проводились на реконструированных машинах DST-5000, причем на ползучесть до разрушения испытывались также недеформированные образцы. Всего было испытано 235 образцов.

Режимы испытаний и соответствующие им значения долговечностей в зависимости от величины предварительной пластической деформации приведены в табл. 1, по данным которой можно судить о сложном влия-

Т а б л и ц а 1

Режимы испытаний	Долговечность $\tau$ , ч				
	$\varepsilon_{II}=0$	$\varepsilon_{II}=2\%$	$\varepsilon_{II}=4\%$	$\varepsilon_{II}=6\%$	$\varepsilon_{II}=8\%$
$T=125^{\circ}\text{C}$ $\sigma=42 \text{ кг/мм}^2$	16	7; 26	19, 42; 48	66; 61; 60; 23;	
$T=125^{\circ}\text{C}$ $\sigma=40 \text{ кг/мм}^2$	44; 89; 55	84	92; 87; 97		94; 66
$T=150^{\circ}\text{C}$ $\sigma=38 \text{ кг/ мм}^2$	5; 5; 8; 9; 14	22; 26; 10	28; 24; 24	26; 21; 24; 33	38; 36; 23
$T=150^{\circ}\text{C}$ $\sigma=36 \text{ кг/ мм}^2$	26; 25; 31; 32; 36; 48; 54	41; 61	44; 47	45; 48	46; 49; 52
$T=150^{\circ}\text{C}$ $\sigma=34 \text{ кг/ мм}^2$	46; 54; 57; 71; 72; 86	79; 91; 85	70; 74; 83; 97	74; 70; 88	58; 64
$T=150^{\circ}\text{C}$ $\sigma=32 \text{ кг/ мм}^2$	127; 56; 48; 124		102		68
$T=175^{\circ}\text{C}$ $\sigma=30 \text{ кг/ мм}^2$	10; 12; 13	12; 14; 21; 26; 14; 22	12; 12; 18; 13; 9; 12	14; 13; 12; 12; 14; 13	9; 8; 11; 6; 9
$T=175^{\circ}\text{C}$ $\sigma=28 \text{ кг/ мм}^2$	21; 23; 27 35	21; 38; 30; 21; 25	22; 36; 25; 28	19; 20; 24	20; 14; 21
$T=175^{\circ}\text{C}$ $\sigma=26 \text{ кг/ мм}^2$	87; 43; 71; 49; 70; 68	33; 30; 42; 43; 41	26; 41; 44; 55	40; 41; 29; 35; 42; 65	39; 30; 29
$T=175^{\circ}\text{C}$ $\sigma=24 \text{ кг/ мм}^2$	95; 96	76	72; 88; 98	75; 94; 73	39; 51; 75
$T=200^{\circ}\text{C}$ $\sigma=24 \text{ кг/ мм}^2$	9; 9; 13; 17; 19; 20	6; 7; 12; 11	7; 9; 10; 7; 4; 9; 10; 9	11; 8; 7; 6	5; 10; 6
$T=200^{\circ}\text{C}$ $\sigma=22 \text{ кг/ мм}^2$	18; 20; 22; 26; 27	21	9; 9; 20	17; 14; 17; 17; 1	12; 15; 15 11; 11
$T=200^{\circ}\text{C}$ $\sigma=20 \text{ кг/ мм}^2$	53; 54; 46; 62	52; 46; 37	31; 37; 40; 27	29; 37; 35; 30	24; 31; 30
$T=200^{\circ}\text{C}$ $\sigma=18 \text{ кг/ мм}^2$	99; 133; 114 78	70; 56	38; 40; 66	34; 61; 51	52; 40; 51

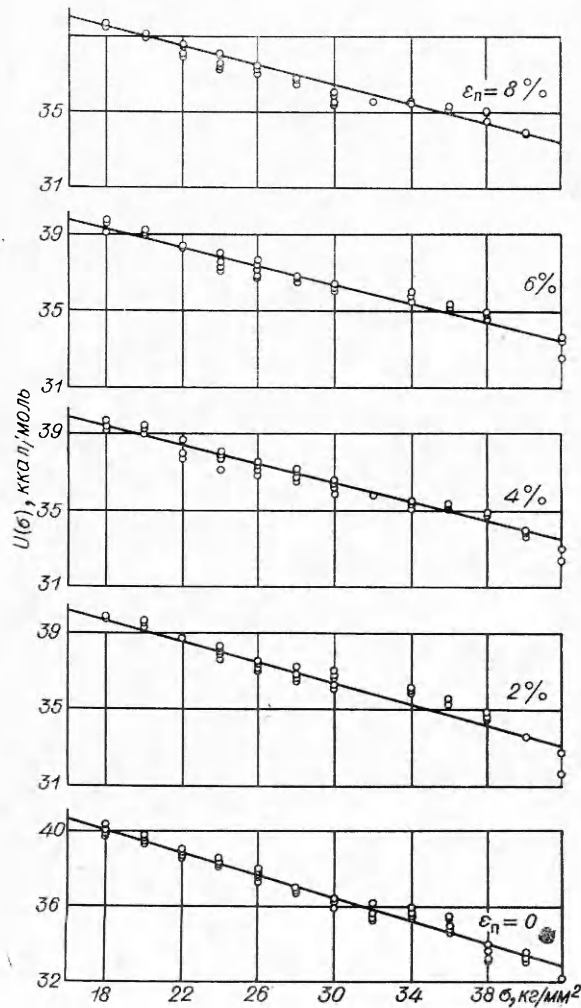
нии предварительной пластической деформации на длительную прочность. Так, при температурах 125, 150°C и напряжениях  $\sigma = 34, 36, 38, 40, 42$  кг/мм<sup>2</sup> предварительная пластическая деформация приводит к увеличению долговечности; при температурах 150, 175°C и напряжениях  $\sigma = 28, 30, 32$  кг/мм<sup>2</sup> заметных изменений долговечности после предварительной пластической деформации не наблюдается, в то время как при температурах 175, 200°C и напряжениях  $\sigma = 18, 20, 22, 24, 26$  кг/мм<sup>2</sup> длительная прочность уменьшается.

Различный характер влияния предварительной пластической деформации на долговечность в условиях ползучести можно объяснить с позиций кинетической теории прочности. Согласно этой теории [1, 2], связь между долговечностью  $\tau$ , напряжением  $\sigma$  и температурой  $T$  может быть описана формулой [1]

$$(1) \quad \tau = \tau_0 \exp [(U_0 - \gamma\sigma)/RT],$$

где  $\tau_0$ ,  $U_0$ ,  $\gamma$  — коэффициенты;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура, К.

Коэффициентам  $\tau_0$ ,  $U_0$  и  $\gamma$  приписывается определенный физический



Ф и г. 1

смысл. Предэкспоненциальный множитель  $\tau_0$ , равный примерно  $10^{-13}$  с, связывают с периодом колебаний атомов в твердом теле. Величину  $U_0$ , имеющую размерность энергии, ставят в соответствие с энергией активации разрывов межатомных связей;  $U_0$  меняется от материала к материалу, но изменение структуры не оказывает заметного влияния на  $U_0$ . За меру прочности материала в зависимости от структуры принимается коэффициент  $\gamma$ . Ему придается смысл коэффициента перенапряжения в местах локального развития разрушения. Чем ниже уровень локальных перенапряжений, тем прочнее материал и тем меньше  $\gamma$ . С этой точки зрения предварительная пластическая деформация должна снизить перенапряжения и уменьшить величину  $\gamma$ , увеличив тем самым долговечность. С другой стороны, нагружение с целью создания пластической деформации должно уменьшить длительную прочность, так как накопление

Т а б л и ц а 2

$\varepsilon_{п}, \%$	$U_0, \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$	$\gamma, \frac{\text{ккал} \cdot \text{мм}^2}{\text{моль} \cdot \text{кг}}$
0	45,4	0,30
2	44,5	0,27
4	43,9	0,25
6	43,8	0,25
8	44	0,25

нарушений рассматривается в [1] как процесс, необратимый во времени. Взаимодействие этих двух противоположных процессов приведет к различному влиянию предварительной пластической деформации на долговечность.

Если применительно к предварительно пластически деформированному материалу уравнение (1) справедливо, то по зависимости

$$U(\sigma) = U_0 - \gamma\sigma = 2,3RT \lg(\tau/\tau_0),$$

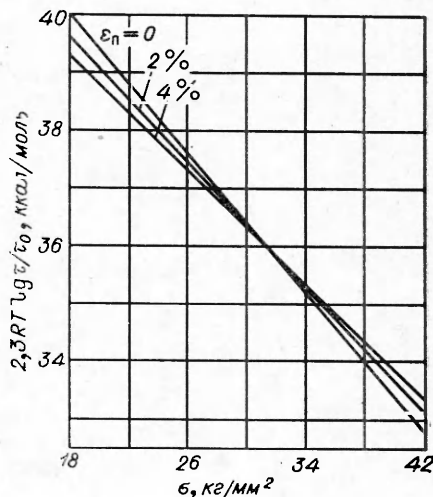
полученной из (1), можно рассчитать  $U(\sigma)$ , приняв  $\tau_0 = 10^{-13}$  с и воспользовавшись измеренными на опыте величинами долговечности  $\tau$ .

График  $U(\sigma)$  от  $\sigma$  должен быть прямой линией для различных  $\tau$ ,  $\sigma$ , и  $T$ .

Результаты обработки экспериментальных данных в координатах  $U(\sigma) - \sigma$  в зависимости от величины предварительной пластической деформации  $\varepsilon_{п}$  представлены на фиг. 1. Для того чтобы можно было судить о величине разброса, приводятся экспериментальные данные отдельно по каждому образцу. Прямые линии проведены на основе статистической обработки по методу наименьших квадратов. Достаточно плотное расположение точек по отношению к прямым линиям говорит о справедливости уравнения (1) для исследуемых режимов. Из графиков путем экстраполяции прямых к оси ординат находится  $U_0$  и по наклонам прямых вычисляются коэффициенты  $\gamma$ . Значения  $U_0$  и  $\gamma$  в зависимости от степени предварительной пластической деформации приводятся в табл. 2, откуда видно, что пластическая деформация больше всего повлияла на величину структурно-чувствительного коэффициента  $\gamma$ . Значения  $\gamma$  понизились на 10% при  $\varepsilon_{п} = 2\%$  и на 16,7% при  $\varepsilon_{п} = 4\%$ . Дальнейшее увеличение предварительной пластической деформации не изменило величины  $\gamma$  (структура стабилизировалась). Значения  $U_0$  снизились до 2—3,5%.

Изменением коэффициента  $\gamma$  можно объяснить различный характер влияния предварительной пластической деформации на длительную прочность. В координатах  $U(\sigma) - \sigma$  прямые пластически деформированных образцов пересекают прямую недеформированного материала (фиг. 2). Поэтому в области меньших напряжений ( $\sigma = 18, 20, 22, 24, 26$  кг/мм<sup>2</sup>) и сравнительно высоких температур (175, 200°C) наблюдается уменьшение длительной прочности после предварительной пластической деформации, в то время как при достаточно высоких напряжениях ( $\sigma = 34, 36, 38, 40, 42$  кг/мм<sup>2</sup>) и более низких температурах (125, 150°C) длительная прочность пластически деформированного материала увеличивается.

Справедливость формулы (1) делает определение длительной прочности после предварительной пластической деформации менее трудоемким и более надежным по сравнению с чисто экспериментальным подходом.



Ф и г. 2

## ЛИТЕРАТУРА

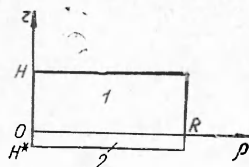
1. Реголь В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., «Наука», 1974.
2. Реголь В. Р. Кинетическая концепция прочности как научная основа для прогнозирования долговечности полимеров под нагрузкой. — «Механика полимеров», 1971, № 1.

УДК 531.299; 531.781

### ТЕРМОУПРУГАЯ ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ДВУХСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРА

Т. Г. Белейчева, К. К. Зилинг

(Новосибирск)



Фиг. 1

Большинство приборов и устройств микроэлектроники представляют собой многослойные структуры, выполненные из материалов с различными коэффициентами термического расширения и упругими константами. Термические напряжения, возникающие в таких системах в результате изменения температуры при их изготовлении и эксплуатации, могут приводить к разрушению, пластической деформации или изменению физических свойств материалов. В то же время существующие расчетные модели не описывают напряженное состояние в реальных системах конечных размеров вследствие принятых упрощений. Так, расчеты [1—3] выполнены на основе технической теории балок, а в работах [4, 5] решение получено для бесконечной полосы на полупространстве.

В данной работе в качестве математической модели реальной системы рассмотрен прямой круговой цилиндр радиуса  $R$ , разделенный плоскостью  $z = 0$  на два слоя толщиной  $H$  и  $H^*$  (фиг. 1). Здесь и далее величины, относящиеся к слою 2, отмечены звездочкой.

Задача о деформации цилиндра при охлаждении от температуры  $T_1$  до  $T_2$  решена в рамках линейной теории термоупругости. Принято, что материал каждого слоя однороден и изотропен, температура не зависит от координат, а коэффициенты термического расширения  $\alpha$  и  $\alpha^*$  не зависят от  $T$ .

Задача рассмотрена в двух постановках:

1. Для произвольного соотношения  $H$  и  $H^*$  разностными методами решена задача, математически состоящая из уравнений Дюгамеля — Неймана [6], записанных в цилиндрических координатах, и граничных условий, соответствующих отсутствию нагрузок на внешних поверхностях тела:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & \sigma_{\rho\rho}(R, z) = 0, \quad \sigma_{r\rho}^*(R, z) = 0; \\
 (2) \quad & \sigma_{zz}(\rho, H) = 0, \quad \sigma_{zz}^*(\rho, -H^*) = 0; \\
 (3) \quad & \tau_{\rho z}(R, z) = 0, \quad \tau_{\rho z}^*(R, z) = 0; \\
 (4) \quad & \tau_{\rho z}(\rho, H) = 0, \quad \tau_{\rho z}^*(\rho, -H^*) = 0.
 \end{aligned}$$

При  $\rho = 0$  выполняются условия осевой симметрии. Кроме того, на плоскости  $z = 0$  слои жестко скреплены: