

ПОЛЗУЧЕСТЬ ДУРАЛЮМИНА Д16Т ПРИ ПОСТОЯННЫХ, ЦИКЛИЧЕСКИХ  
И СТУПЕНЧАТО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАГРУЗКАХ

А. П. Кузнецов, Н. А. Мошкин

(Новосибирск)

Результаты экспериментов по ползучести дуралюмина Д16Т при постоянных и некоторых видах меняющихся нагрузок и сравнение их с расчетами по ряду гипотез, описывающих ползучесть при переменных напряжениях, приведены в работах [1-8]. Ниже также приводятся результаты экспериментальных исследований ползучести листового дуралюмина Д16Т при постоянных, ступенчато изменяющихся и циклических нагрузках при температурах 155, 207 и 255° С и результаты экспериментальных исследований ползучести пруткового дуралюмина Д16Т при постоянных и ступенчато изменяющихся нагрузках при температуре 207° С. Получены формулы для описания кривых ползучести при постоянном напряжении и проведена проверка гипотез, предложенных для описания ползучести при переменных напряжениях.

Испытания плоских образцов проводились на машинах ДСТ-5000, имевших специальное приспособление для приложения циклических нагрузок или нагрузок, меняющихся ступенями [8].

Образцы изготавливались из листа дуралюмина Д16Т в состоянии поставки. Толщина листа 2 мм. Ширина образца 10 мм, рабочая длина 100 мм.

Испытания круглых образцов проводились на машинах Zst 3/3. Приложение ступенчатых нагрузок осуществлялось вручную.

Круглые образцы с рабочей частью диаметром 8 мм и длиной 100 мм изготавливались из прутка. Рабочая часть плоских и круглых образцов ограничивалась выступами, на которых закреплялись тяги экстензометра для измерения деформаций.

Все образцы разогревались до заданной температуры примерно в течение часа, затем выдерживались при заданной температуре один-два часа, после чего к ним прикладывалась нагрузка. При постоянной нагрузке на каждом уровне напряжений испытывалось по 20—30 круглых и по 5—8 плоских образцов. Кривые ползучести плоских образцов, полученные осреднением результатов испытаний всех образцов на данном уровне напряжения, приведены кружками на фиг. 1, где  $t$  — время,  $\sigma$  — напряжение в кг/мм<sup>2</sup>. Кривые ползучести плоских и круглых образцов могут быть представлены формулами

$$p = A\sigma^n t^m, \text{ или } p = B \operatorname{sh}(\sigma/k) t^m \quad (1)$$

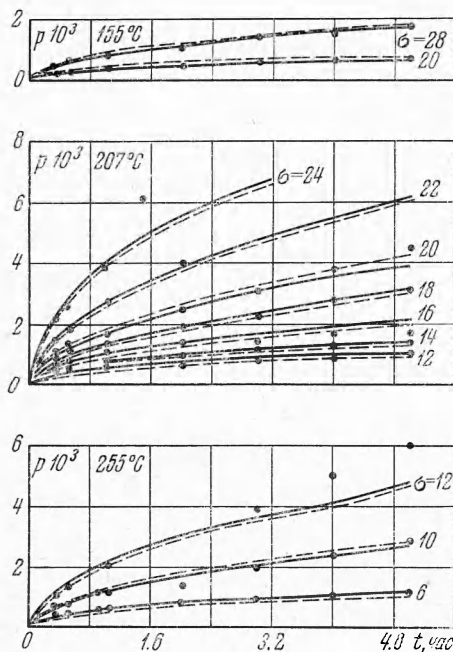
где  $t$  — время,  $\sigma$  — напряжение,  $p$  — деформация ползучести, а значения постоянных  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $m$  выбраны в соответствии с таблицей.

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{кг/мм}^2$	$m$	$n$	$A, \text{мм}^2/\text{кг}^n\text{час}^m$	$k, \text{кг/мм}^2$	$B, 1/\text{час}^m$
155	$\sigma \geq 20$	0.515	2.9	$4.7 \cdot 10^{-8}$	8.3	$5.10 \cdot 10^{-5}$
207	$\sigma \leq 20$	0.542	2.67	$5.4 \cdot 10^{-7}$	5.5	$9.45 \cdot 10^{-5}$
	$\sigma \geq 20$		4.44	$2.86 \cdot 10^{-9}$		
255	$\sigma \leq 10$	0.55	1.57	$2.85 \cdot 10^{-5}$	4.5	$2.52 \cdot 10^{-4}$
	$\sigma \geq 10$		3.2	$6.75 \cdot 10^{-7}$		
207	$\sigma \leq 16$	0.5	1.20	$1.04 \cdot 10^{-5}$	5.5	$3.29 \cdot 10^{-5}$
	$\sigma \geq 16$		3.3	$3.35 \cdot 10^{-8}$		

Кривые, полученные по формуле (1.2), на фиг. 1 нанесены пунктиром, а полученные по формуле (1.1) — сплошной линией. Обе формулы хорошо описывают кривые ползучести для плоских образцов. Но формула (1.1) более проста при решении задач ползучести при слабо меняющихся напряжениях. Формула (1.2) становится более удобной при решении задач, где напряжения в процессе ползучести меняются значительно, так как она описывает кривые ползучести при одном значении постоянных во всем диапазоне изменения напряжений. Хуже описывают формулы (1) кривые для круглых образцов, где имеется участок установившейся ползучести.

Экспериментальное исследование ползучести при меняющихся нагрузках проводилось при нескольких видах ступенчатых программ. Так, к плоским образцам при 155° С прикладывалась вначале нагрузка 20 кг/мм<sup>2</sup>, а затем в разные моменты времени к ним ступенчато прикладывалась нагрузка 28 кг/мм<sup>2</sup>; при 207° С — вначале 18, а затем 24 кг/мм<sup>2</sup>; при температуре 255° С — вначале 6, а затем 12 кг/мм<sup>2</sup>. Результаты испытаний плоских образцов приведены пунктиром на фиг. 2. На этой фигуре по оси ординат отложена деформация ползучести, полученная осреднением результатов испытаний четырех — восьми образцов, к которым ступенчатая нагрузка прикладывалась в один

и тот же момент. Круглые образцы испытывались при шести ступенчатых программах, в которых напряжение либо повышалось, либо понижалось ступенями через различные промежутки времени. По каждой программе было испытано от 10 до 20 образцов.



Фиг. 1

Поэтому для построения кривых по обеим гипотезам достаточно иметь кривые ползучести при постоянных напряжениях, равных напряжениям на каждой из ступеней.

На фиг. 2,3 штрих-пунктиром нанесены кривые, полученные по гипотезе упрочнения построением непосредственно по исходным кривым ползучести. Как видно из сравнения с экспериментом, при возрастании нагрузки во всех случаях теория дает значительно заниженные результаты. Результаты, полученные по гипотезе течения, лежат еще ниже при увеличении нагрузки и мало отличаются от результатов теории упрочнения при уменьшении нагрузки.

В работе [3] предлагается ввести в гипотезу упрочнения вместо параметра  $p$  новый параметр  $q = \int \sigma dp$ . Введение параметра  $q$ , вообще говоря, уменьшает отмеченные выше систематические расхождения. Однако в данном случае соответствие теории и эксперимента, как показали расчеты, улучшается весьма незначительно. Больше улучшение может быть достигнуто, если вместо  $q$  ввести параметр  $q_1 = \int \sigma^s dp$ , где  $s$  больше единицы и выбирается по результатам одного из испытаний при ступенчатом изменении нагрузки.

В работе [2] предложено для описания ползучести при переменных нагрузках вводить в гипотезу упрочнения дополнительный параметр,

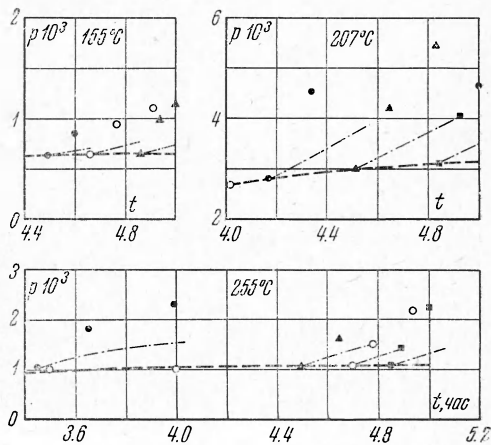
$$\frac{\theta}{R} = \frac{1}{R} \int p d\epsilon$$

где  $R$  определяется по результатам одного или нескольких испытаний при ступенчатом

Осредненные результаты испытаний по одной из программ приведены кружками на фиг. 3.

Для описания неустановившейся ползучести при меняющейся во времени нагрузке предложено несколько гипотез, из которых математически корректными при изменении нагрузки ступенями будут гипотезы упрочнения, течения и наследственности. Проверить применимость гипотезы наследственности в данном случае не удалось, так как для расчетов с использованием указанной гипотезы требуется построить по кривым ползучести, полученным при нескольких уровнях напряжения, изохронные кривые и описать их формулами. Это оказалось невозможным, так как при 155 и 255°C получено мало исходных кривых ползучести, а при 207°C необходимое для использования гипотезы наследственности подобие изохронных кривых соблюдается лишь на ограниченных участках времени.

Для проверки гипотез течения и упрочнения при ступенчатом изменении нагрузки исходные кривые ползучести не требуются описывать формулами. Согласно гипотезе упрочнения, скорость ползучести в данный момент времени зависит лишь от напряжения и деформации ползучести к этому моменту. По гипотезе течения, скорость ползучести определяется лишь напряжением и временем, прошедшим с начала испытаний.

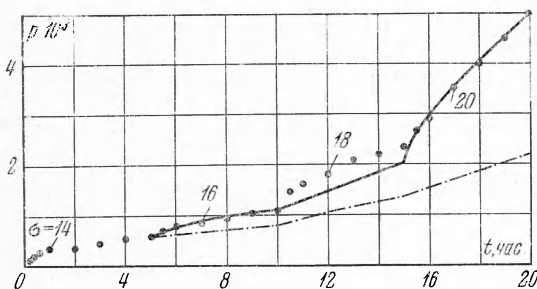


Фиг. 2

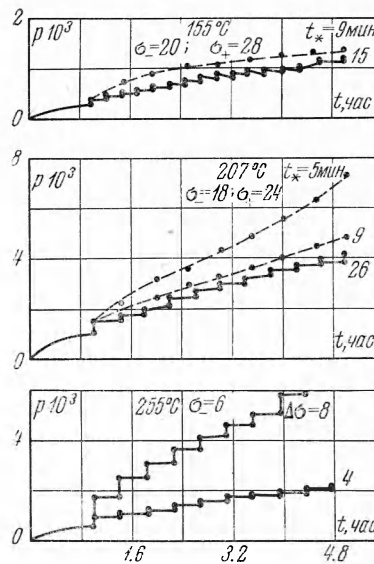
изменении нагрузки. Будем описывать ползучесть круглых образцов при меняющемся напряжении формулой

$$p \cdot p^{\mu-1} = (B^{\mu} m) \operatorname{sh}^{\mu} (\sigma/k + \theta/R) \quad (\mu = 1/m) \quad (2)$$

из которой при постоянном напряжении следует формула (1.2). Значения  $B$ ,  $m$  и  $k$  возьмем из таблицы, а величину  $R = 3.57 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мм}^2$  получим, обрабатывая испытания по программе фиг. 3. Для построения кривых при ступенчатом изменении нагрузки применим способ, в котором вначале строятся по формуле (2) кривые, соответствующие постоянным значениям  $\theta$ , а затем уже графически, как и при использовании обычной гипотезы упрочнения, находятся кривые, когда напряжение изменяется ступенями. Результаты такого расчета приведены на фигуре 3 сплошной линией. Из сравнения с результатами испытаний по остальным программам следует, что введение параметра  $\theta$  в гипотезу упрочнения значительно улучшает соответствие экспериментальных и расчетных результатов при возрастании нагрузки. При уменьшении же нагрузки соответствие ухудшается, но незначительно. Поэтому при сложном изменении нагрузки ступенями введение параметра  $\theta$  должно вообще приводить к более близкому соответствию результатов опыта и расчета.



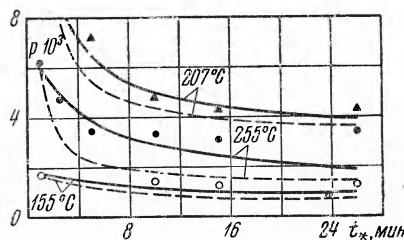
Фиг. 3



Фиг. 4

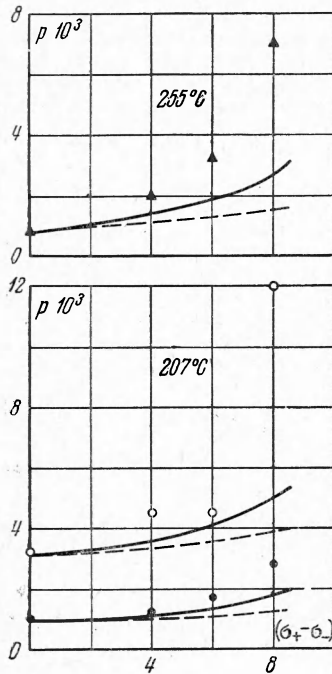
На образцах из листового материала проводилось исследование ползучести при циклически меняющихся нагрузках. Был принят такой вид цикла: образец находится под некоторым напряжением  $\sigma_-$ , к нему периодически ступенью прикладывается более высокое напряжение  $\sigma_+$ , при котором образец выдерживается 1 мин, затем напряжение уменьшается вновь до уровня  $\sigma_-$  и т. д. Время выдержки на нижнем уровне в разных экспериментах менялось от 1.5 до 25 мин, время выдержки на верхнем уровне во всех экспериментах составляло 1 мин. Первый пик прикладывался через час после начала испытаний.

На фиг. 4 точками и пунктиром приведены осредненные по четырем — пяти образцам некоторые результаты испытаний при различных значениях длительности цикла  $t_*$ , но при одинаковых значениях  $\sigma_-$  и  $\sigma_+$  и даны результаты эксперимента при длительности цикла 26 мин и постоянном значении  $\sigma_-$ , но при различных значениях  $\sigma_+$ . Из анализа кривых фиг. 4 следует, что экспериментальные кривые во всех случаях располагаются между кривыми, соответствующими постоянно действующим нагрузкам  $\sigma_-$  и  $\sigma_+$ . Причем с увеличением времени пребывания на нижнем уровне напряжения и с уменьшением разности  $\sigma_+ - \sigma_-$  кривые при циклически действующей нагрузке, как правило, приближаются к кривой, полученной при постоянно действующей нагрузке  $\sigma_-$ . На некоторых кривых заметно явление возврата, т. е. уменьшение деформации ползучести после приложения более низкой нагрузки, но величина возврата незначительна. Поэтому весьма вероятно, что при данных частотах и данной форме циклов гипотеза упрочнения сможет качественно удовлетворительно описывать ползучесть при циклически меняющемся напряжении; вводя дополнительные параметры в гипотезу упрочнения, вероятно, можно добиться хорошего количественного совпадения.



Фиг. 5

На фиг. 5 приведены осредненные значения деформаций ползучести, полученных после пяти часов испытаний, в зависимости от длительности цикла  $t_*$ . Треугольниками отмечены результаты испытаний при  $207^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_- = 18 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_+ = 24 \text{ кг/мм}^2$ ; черными кружками — результаты испытаний при  $255^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_- = 6 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_+ = 12 \text{ кг/мм}^2$ ; светлыми кружками — результаты при  $155^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_- = 20 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_+ = 28 \text{ кг/мм}^2$ . Укажем,



Фиг. 6

что точки, полученные при  $t_* = 26 \text{ мин}$ , лежат выше точек, полученных при  $t_* = 15 \text{ мин}$ , а в некоторых случаях и выше точек для  $t_* = 9 \text{ мин}$ . Это есть следствие того, что при всех температурах с увеличением времени выдержки на нижнем уровне напряжения увеличивается начальная скорость ползучести при приложении  $\sigma_+$ .

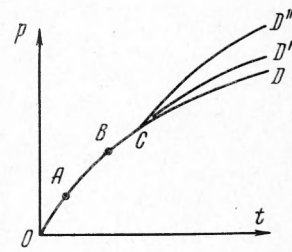
На фиг. 6 приведены осредненные результаты испытаний при  $t_* = 26 \text{ мин}$  и различных значениях разности  $\sigma_+ - \sigma_-$ . По оси абсцисс здесь отложена разность  $\sigma_+ - \sigma_-$ , а по оси ординат — среднее значение деформации ползучести, накопленной за пять часов испытаний. Черными кружками отмечены результаты испытаний при  $207^\circ\text{C}$  и  $\sigma_- = 12 \text{ кг/мм}^2$ , светлыми кружками — при той же температуре и  $\sigma_- = 18 \text{ кг/мм}^2$ , треугольниками — результаты испытаний при  $255^\circ\text{C}$  и  $\sigma_- = 6 \text{ кг/мм}^2$ . Пунктиром на фиг. 5, 6 нанесены значения деформации ползучести, полученные по исходным кривым при использовании гипотезы упрочнения. Сплошной линией нанесены значения, полученные указанным выше графическим расчетом с введением в гипотезу упрочнения параметра  $\theta$ . Значения  $R$ , входящие в формулу, определялись по результатам экспериментов, приведенных на фиг. 2. Для температуры  $155^\circ\text{C}$  получено значение  $R = 6.14 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мм}^2$ , для  $207^\circ\text{C}$  — значение  $R = 22.7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мм}^2$ , для  $255^\circ\text{C}$  — значение  $R = 9.0 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мм}^2$ .

Сравнение экспериментальных значений с расчетными показывает, что гипотеза упрочнения во многих случаях дает очень заниженные результаты. Введение же в гипотезу упрочнения параметра  $\theta$  приводит к хорошему соответствию результатов

расчета и эксперимента на фиг. 5, хотя при  $t_* = 26 \text{ мин}$  совпадение оставляет желать лучшего, и к более близкому качественному соответствию (по сравнению с обычной гипотезой упрочнения) на фиг. 6. Удовлетворительного же количественного соответствия на фиг. 6 получить не удалось ни в том, ни в другом случаях.

Таким образом, на основании приведенных выше результатов для описания кривых ползучести дуралюмина Д16Т при постоянных нагрузках можно рекомендовать зависимость от напряжения в виде гиперболического синуса. При меняющихся ступенях нагрузках описывать ползучесть можно гипотезой упрочнения, в которую вводится дополнительный параметр  $\theta = \int p d\sigma$ . Гипотеза упрочнения в том же виде может быть принята и для определения деформаций ползучести при циклически меняющемся напряжении, если время выдержки на верхнем уровне напряжения не очень мало, по сравнению со временем выдержки на нижнем уровне напряжения. Если же время выдержки при напряжении  $\sigma_-$  намного больше времени выдержки при напряжении  $\sigma_+$ , необходимо при расчете учитывать влияние длительности выдержки при малом напряжении на скорость ползучести при приложении более высокого напряжения.

Основываясь на проведенных выше экспериментах, можно сделать предположение, что во время выдержки  $t_*$  на более низком уровне напряжения, вероятно, происходят процессы, в результате которых после перехода вновь на более высокий уровень напряжений процесс ползучести продолжается с точки  $C$  (которой характеризуется величина деформации к моменту повторного нагружения) не по кривой  $BD$ , перенесенной началом в точку  $C$  (кривая  $CD'$  на фиг. 7), а по кривой  $AD$ , где точка  $A$  лежит ближе к началу координат, чем точка  $B$  (кривая  $CD''$ ). И чем длительнее выдержка  $t_*$ , тем ближе точка  $A$  будет лежать к началу координат, и, следовательно, тем больше будет начальная скорость ползучести при переходе вновь к напряжению  $\sigma_+$ . В данных эксперимен-



Фиг. 7

тах при  $t_* = 15$  мин точка  $A$  уже заметно сдвигается к началу координат. При  $t_* = 0$ , очевидно, точка  $A$  совпадет с точкой  $B$ .

Распространяя предложенный прием на описание ползучести при наличии перерывов в нагружении ( $\sigma = 0$ ), получим, что при отсутствии деформаций восстановления после разгрузки перерывы могут лишь увеличить деформацию ползучести (если кривую ползучести строить только для времени, когда действует нагрузка) и тем значительнее, чем короче время действия нагрузки и дольше время перерывов. Уменьшение же деформаций ползучести можно получить при некоторых видах циклов, если учесть деформации восстановления. Справедливость полученных выводов необходимо проверить специально поставленными экспериментами.

Поступила 3 III 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Наместников В. С., Хвостунков А. А. Ползучесть дуралюмина при постоянных и переменных нагрузках. ПМТФ, 1960, № 4.
2. Наместников В. С., Работнов Ю. Н. О гипотезе уравнения состояния при ползучести. ПМТФ, 1961, № 3.
3. Наместников В. С., Работнов Ю. Н. О наследственных теориях ползучести. ПМТФ, 1961, № 4.
4. Наместников В. С. О ползучести алюминиевого сплава при переменных нагрузках. ПМТФ, 1964, № 2.
5. Вилесова Н. С., Наместников В. С. Об одном параметре упрочнения. ПМТФ, 1964, № 3.
6. Ратнер С. И., Понарьина Т. К. Ползучесть и длительная прочность при программном нагружении алюминиевых и титановых сплавов. Сб. «Статическая прочность и выносливость конструкционных сплавов при повышенных температурах», Оборонгиз, 1961.
7. Вилесова Н. С., Хвостунков А. А. Ползучесть листового дуралюмина Д16. Сб. «Ползучесть и длительная прочность», Изд. СО АН СССР, 1963.
8. Мошкин Н. А., Кузнецов А. П. Ползучесть листового дуралюмина Д16АТ при постоянных и циклических нагрузках. Сб. «Ползучесть и длительная прочность», Изд. СО АН СССР, 1963.

#### УСТОЙЧИВОСТЬ ОГРАНИЧИВАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОТОКА, ОБРАЗОВАННЫХ НЕСВЯЗНЫМИ ГРУНТАМИ, И КРИТЕРИЙ ГРЯДООБРАЗОВАНИЯ

*Н. Б. Гереселидзе (Тбилиси)*

В работе рассматриваются вопросы устойчивости ложа речных русел и каналов, имеющие важное значение при решении многих задач гидравлики. В отличие от формул неразмывающих скоростей, посредством которых в настоящее время главным образом производится оценка устойчивости ложа русла против размыва и которые выведены из схемы силового воздействия потока в статических условиях при идеализированной форме обтекания изолированной частицы, изложенный метод основан на условии динамической устойчивости и выведен путем последовательного применения основных положений общей теории устойчивости движения А. М. Ляпунова.

Течение жидкости в деформируемом русле, при наличии процессов размыва с последующей аккумуляцией размываемого материала, представляется как волновое движение, обусловленное воздействием возмущений на систему «поток — деформируемая твердая граница».

В соответствии с общей теорией устойчивости движения в «малом» и основными положениями гидродинамической теории устойчивости [1-3], эти возмущения предполагаются малыми (по амплитуде) синусоидальными волнами. Если возмущение имеет форму «всхолмления», исчезающего при  $x = \pm \infty$ , то и в этом случае при помощи интеграла Фурье его можно выразить опять-таки через элементарные синусоидальные возмущения [3].

Анализ проводится с целью установления условий, при которых возникший неустановившийся режим (возмущенное движение) будет вырождаться в первоначальное равномерное состояние (невозмущенное движение), т. е. начавшийся размыв русла и перемещение наносов в форме волн или гряд будут экспоненциально убывать во времени.

Представление начальной фазы деформации русла в виде перемещающихся донных песчаных волн достаточно хорошо согласуется с экспериментальными фактами [4]. Кроме того, экспериментально установлено также, что массовое движение наносов по дну до определенных, сравнительно больших скоростей течения потоков происходит в форме волнообразного движения.