

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗБРОСА КРИВЫХ ПОЛЗУЧЕСТИ

А. П. Бузнецов, В. А. Трубий

(Новосибирск)

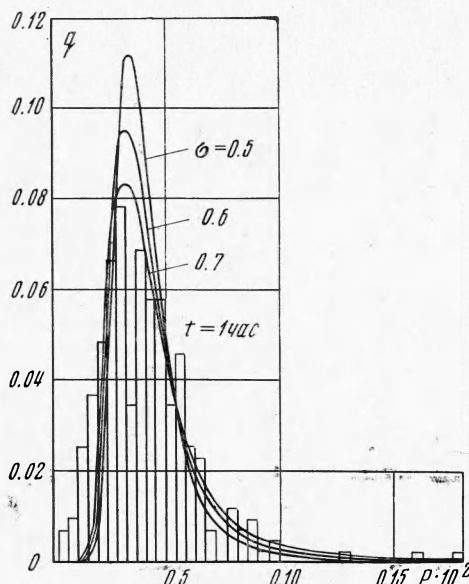
Учет разброса кривых ползучести при расчетах на ползучесть ведет к более обоснованному выбору расчетных значений времени и напряжений, а в ряде задач разброс может явиться источником начальных возмущений [1] или значительной неравномерности напряжений по сечению, что приводит к существенному изменению подхода к решению задач ползучести. В статье приведены результаты исследования разброса 293 кривых ползучести, полученных на образцах из сплава Д16Т при одних и тех же

условиях испытаний: температуре  $207^\circ\text{C}$  и напряжении  $18 \text{ кг/мм}^2$ . Проведен анализ причин разброса и получена формула, позволяющая описать кривые ползучести как случайные функции времени.

Образцы с резьбой вытачивались из 18-миллиметровых прутков в состоянии поставки. Длина рабочей части 100 мм и диаметр 8 мм, длительность испытаний 20 час.

По 13 образцам этой же партии были определены механические характеристики при нормальной температуре. Среднее арифметическое значение временного сопротивления  $\sigma_b = 54.1 \text{ кг/мм}^2$ , наименьшее и наибольшее значения были равны соответственно  $49.3 \text{ кг/мм}^2$  и  $56.4 \text{ кг/мм}^2$ . При температуре  $200^\circ\text{C}$  среднее значение  $\sigma_b$  для прутка Д16Т согласно [2] равно  $41 \text{ кг/мм}^2$ . Таким образом, описываемые исследования проводились при напряжениях  $\sim 0.45 \sigma_b$  для данной температуры.

Образцы на ползучесть испытывались на четырех машинах, каждая из которых имеет три независимых, оборудованных двухсекционными печами установки для нагружения образцов постоянной силой. Постоянная температура в печах поддерживалась dilatометрическими регу-



Фиг. 1

ляторами. Колебания температуры относительно средней составляли  $\pm 2^\circ\text{C}$ , период колебаний  $\sim 15$  мин, но так как во всех экспериментах колебания были примерно одинаковы, они не должны были влиять на разброс кривых. Различия температур по длине образца во время испытаний не превышало  $1^\circ\text{C}$ . Смонтированный с экстензометром образец вставлялся в разогретую печь, приблизительно час нагревался до заданной температуры, затем выдерживался в течение двух часов при этой температуре, после чего к образцу плавно прикладывалась растягивающая нагрузка. После приложения нагрузки отмечалось начальное показание индикатора, измеряющего удлинение, а далее через определенные промежутки времени по индикатору находилась деформация ползучести образца. На всех машинах применялись индикаторы часового типа с ценой деления  $0.002 \text{ мм}$ .

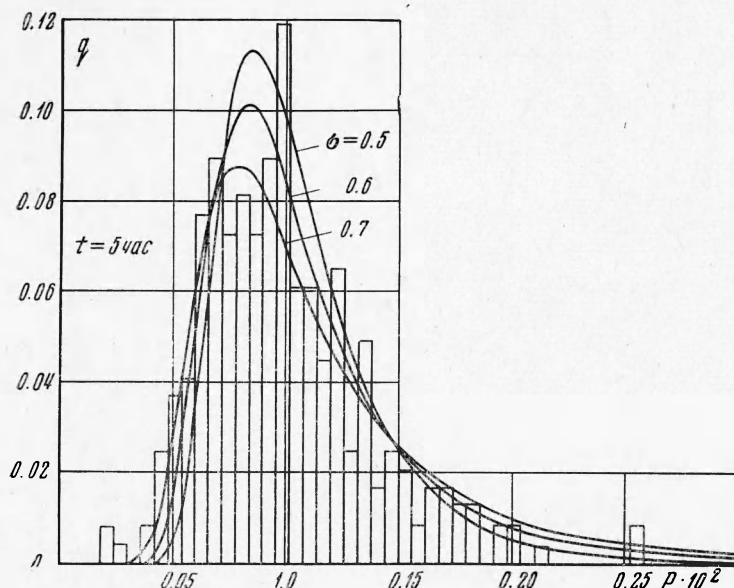
Температура измерялась на систематически проверяемом ручном потенциометре III класса 0.5. Датчиками температуры служили хромель-алюмелевые термодпары, максимальная погрешность которых согласно тарифовке при температуре  $200^\circ\text{C}$  составляла  $2.2^\circ\text{C}$ . В сумме общая погрешность в определении температуры не превышала  $3.2^\circ\text{C}$ .

Погрешность в напряжении при  $18 \text{ кг/мм}^2$  согласно тарифовке была менее  $0.3 \text{ кг/мм}^2$ .

В координатах время  $t$ , деформация ползучести  $p$ , кривые, полученные при испытании отдельных образцов не были совершенно подобными, хотя большинство их к двадцатому часу оканчивалось участком установившейся ползучести. Некоторые кривые после 10–15 час испытаний уже имели стадию неустановившейся ползучести.

На фиг. 1–4 приведены гистограммы для распределения деформаций ползучести образцов после 1, 5, 10 и 20 час испытаний. Для построения каждой гистограммы весь

диапазон деформаций разбивался на 40 равных интервалов  $\Delta p_i$ , и по результатам испытаний подсчитывалась частота попаданий в каждый из интервалов. Высота столб-



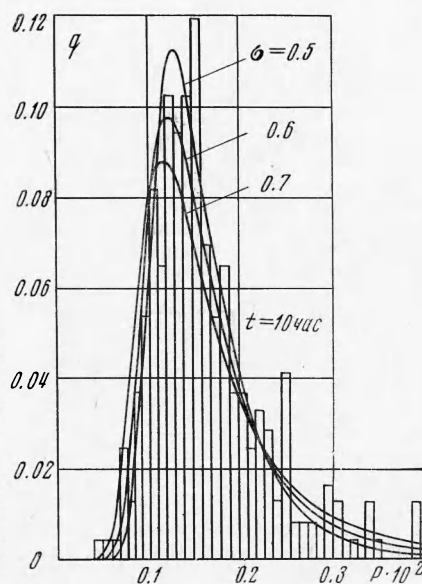
Фиг. 2

ца, построенного на интервале, пропорциональна числу попаданий. Гистограммы показывают, что распределение деформаций ползучести не является нормальным и имеет положительную асимметрию.

На фиг. 5 для испытанной партии образцов даны кривые, построенные по различным значениям (характеризующим пучок кривых): по средним арифметическим значениям (1), по значениям медианы (2) и по значениям моды (3). Медиана, которая делит весь ряд деформаций пополам, по мнению авторов, наиболее удобна для построения осредненных кривых, если количество испытаний ограничено, а разброс кривых ползучести велик. Для определения медианы не требуется вычислений, и можно учитывать все полученные экспериментальные кривые, не проводя перед осреднением отбраковки. Построение медианы возможно и в том случае, когда часть образцов уже разрушилась, так как отдельные, даже выпадающие кривые слабо влияют на ее положение.

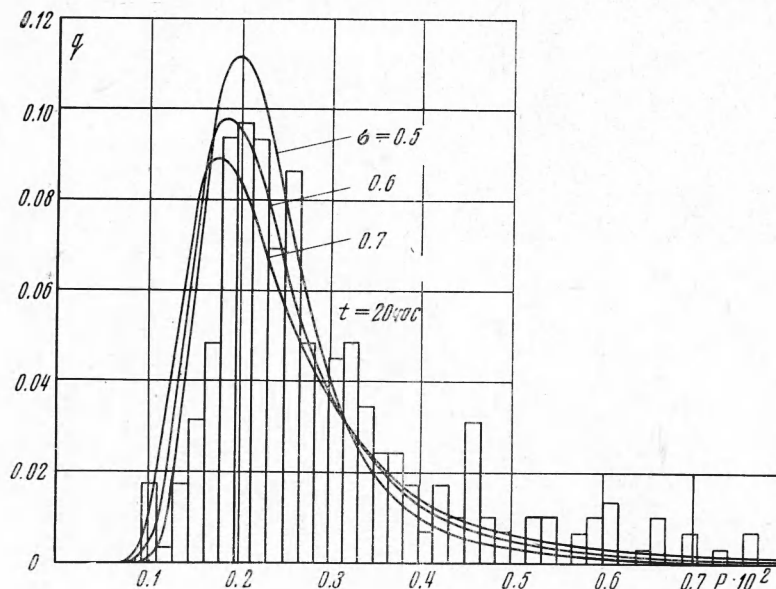
По результатам испытаний был проведен анализ величины и причин разброса. Установлено, что большой разброс сохраняется и при испытаниях образцов из одного и того же прутка, и при испытаниях на одной и той же установке с печью, в то время как отклонения осредненных кривых от общей осредненной кривой вполне объясняются значительно меньшим числом образцов, поскольку из одного прутка испытывалось от 7 до 18 образцов, а на одной установке — от 17 до 33 образцов.

Кривые, построенные в этих случаях по медианам, меньше отклонялись от кривой 2, чем кривые, построенные по средним арифметическим значениям, отклонялись от кривой 1. Во втором случае отклонения при 20 час лежали в пределах от  $-0.09 \cdot 10^{-2}$  до  $0.10 \cdot 10^{-2}$ , а в первом случае от  $-0.07 \cdot 10^{-2}$  до  $0.08 \cdot 10^{-2}$ .



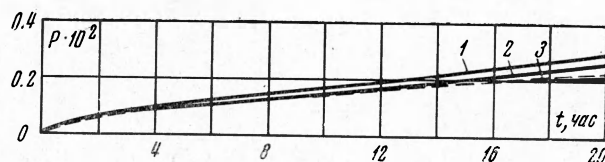
Фиг. 3

Для оценки влияния возможных погрешностей в величине действующей продольной нагрузки и в температуре были проведены испытания при небольших отклонениях от заданных параметров. При напряжении  $18 \text{ кг/мм}^2$  86 образцов были испытаны при температуре  $205^\circ \text{C}$ , а 93 образца при температуре  $200^\circ \text{C}$ . При температуре  $207^\circ \text{C}$  93 образца были испытаны при напряжении  $18.5 \text{ кг/мм}^2$  и 77 образцов при напряжении  $17.5 \text{ кг/мм}^2$ . Полученные средние арифметические кривые приведены на фиг. 6 (сплошной линией для разных напряжений, пунктиром для различных температур, жирной линией нанесена кривая 1 с фиг. 5). Пользуясь этими кривыми, можно определить приближенно величину разброса, вызываемого отклонениями в нагрузке и температуре.



Фиг. 4

Выяснялось также, оказывает ли влияние обработка поверхности образцов на ползучесть и на разброс кривых ползучести. Испытания велись на таких же образцах из материала Д16Т, но из прутков диаметром  $22 \text{ мм}$ . При температуре  $207^\circ \text{C}$  и напряжении  $18 \text{ кг/мм}^2$  было испытано 162 образца: 74 из них были с полированной поверхностью, у остальных поверхность была обработана резцом на токарном станке. Построенные по средним арифметическим значениям кривые и границы разброса образцов показаны на фиг. 7 (сплошной линией для неполированных, пунктиром для полированных). Сравнение показывает, что полировка поверхности образцов совершенно не влияла ни на их ползучесть, ни на пределы разброса.



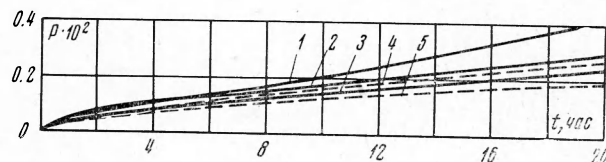
Фиг. 5

Партия прутков диаметром  $22 \text{ мм}$  несколько отличалась от основной партии по химическому составу. Появилась возможность оценить влияние на ползучесть Д16 небольших, допускаемых ГОСТом изменений химического состава. Поскольку при нормальной температуре пластичность дуралюмина повышается с увеличением отношения содержания меди к магнию, естественно сравнить обе партии по величине отношения  $\text{Cu} / \text{Mg}$ . В основной партии прутков содержалось  $4.15\%$  меди и  $1.50\%$  магния ( $\text{Cu} / \text{Mg} = 2.77$ ), в партии прутков диаметром  $22 \text{ мм}$  меди было  $4.10\%$ , а магния  $1.27\%$  ( $\text{Cu} / \text{Mg} = 3.23$ ). Вероятно, поэтому и ползучесть второй партии была выше.

При напряжении  $6 \text{ кг/мм}^2$  и температуре  $207^\circ \text{C}$  испытывались 18 отожженных при  $360^\circ \text{C}$  и охлажденных в печи образцов. Ползучесть сплава во много раз увеличилась, разброс кривых остался таким же большим.

Таким образом, из эксперимента следует, что качество обработки поверхности не влияет на скорость ползучести. Химический состав сильно влияет на скорость ползучести, но разброс в проведенных испытаниях не может быть объяснен различиями химического состава, поскольку все образцы были изготовлены из одной партии.

Попробуем оценить влияние на разброс погрешностей в нагрузке и температуре, считая, что при малых отклонениях зависимость величины деформации ползучести от



Фиг. 6

температуры и напряжения линейная. Согласно приведенным выше данным погрешность в температуре не превышает  $\pm 3.2^\circ \text{C}$ , а по результатам тарировки погрешность в продольной нагрузке  $\pm 0.3 \text{ кг/мм}^2$ . Полагаем также, что ошибки вследствие неисправности оборудования исключены. Пользуясь графиками фиг. 7, получим, что максимальный разброс вследствие погрешностей в температуре  $\pm 12\%$ , а разброс из-за погрешностей в продольной нагрузке от  $+25$  до  $-10\%$ . В сумме, если считать влияние этих причин независимым, получим разброс от  $+37$  до  $-22\%$ , что несколько больше разброса осредненных кривых, полученных после обработки испытаний по каждой установке в отдельности.

Остальную часть разброса (от 130 до  $-45\%$ ) следует, вероятно, объяснить внутренним строением материала образцов и неопределенностью величины эксцентриситета при приложении нагрузки. Эта часть разброса, видимо, не уменьшится даже при полном отсутствии погрешностей в продольной нагрузке и температуре.

Влияние эксцентриситета на разброс в работе не исследовалось из-за отсутствия методики его определения.

Однако измерение деформаций при помощи четырех тензодатчиков, наклеенных на поверхность образца с разных сторон, показало, что на всех машинах напряжения на противоположных сторонах образца отличались не более чем на  $10\%$ . Можно предположить поэтому, что влияние эксцентриситета на разброс не являлось решающим.

Допустим, что разброс кривых ползучести определяется разбросом величины временного сопротивления образцов. Для описания кривой при постоянной температуре и постоянном напряжении примем формулу

$$p = B \text{sh} \frac{\sigma}{n} t^m \quad (1)$$

где  $B = 2.94 \cdot 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ,  $m = 0.58$ , а  $n$  в соответствии с работой [3], где даны результаты испытания этой же партии образцов, равно  $5.5 \text{ кг/мм}^2$ . Кривая, рассчитанная по формуле (1), на фиг. 5 дана пунктиром и хорошо совпадает с экспериментальной кривой 3. Преобразуем равенство (1)

$$p = B \text{sh} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \frac{\sigma_b}{n} \right) \quad (2)$$

Меняя  $\sigma_0$  в пределах от 49.3 до  $56.4 \text{ кг/мм}^2$ , в соответствии с результатами проведенных выше испытаний, получим, что деформация при 20 час меняется от  $0.165 \cdot 10^{-2}$  до  $0.253 \cdot 10^{-2}$ , что значительно меньше полученного в эксперименте разброса.

В работе [1] предлагается учесть разброс кривых ползучести в расчетах независимо от его причин, вводя в формулу для описания кривых вместо постоянных величин некоторые случайные. Попробуем описать пучок полученных кривых формулой

$$p^* = B \text{sh} \frac{\sigma}{n^*} t^m \quad (3)$$

(где  $B$  и  $m$  — постоянные, а лишь  $n^*$  — случайная величина), тем самым предполагая, что кривые нигде, кроме начала координат, не пересекаются между собой. Допустим, что значения  $n^*$  распределены в соответствии с нормальным законом, плотность вероятности которого характеризуется функцией

$$g(n) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \frac{(n - 5.5)^2}{2\sigma^2} \quad (4)$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение величины  $n$ .

Имея функциональную зависимость (3) между  $n^*$  и  $p^*$ , найдем в соответствии с [4] плотность распределения  $q(p)$ . Затем, подбирая различные значения  $\sigma$  и приравнявая площадь под гистограммами к площади под кривыми  $q(p)$  для различных значений времени, получим, что наилучшее соответствие гистограмм (фиг. 1—4) плотности распределения  $q(p)$  будет при  $\sigma = 0.6$ .

Поступила 26 VII 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Куршин Л. М. Об одном возможном подходе к задачам устойчивости стержней в условиях ползучести. В сб. «Ползучесть и длительная прочность», Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
2. Справочник по авиационным материалам, т. 2., М., Оборонгиз, 1958.
3. Кузнецов А. П., Мошкин Н. А. Ползучесть дюралюмина Д16Т при постоянных, циклических и ступенчато изменяющихся нагрузках. ПМТФ, 1967, № 5.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1964.

Технический редактор Э. Ф. Бунова

Сдано в набор 2/VIII-1972 г. Т-13679 Подписано к печати 18/X-1972 г. Тираж 2050 экз.  
Зак. 996 Формат бумаги 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub> Усл. печ. л. 16,8 Бум. л. 6 Уч.-изд. л. 16,7

2-я типография издательства «Наука». Москва, Шубинский пер., 10