Доклады Академии наук СССР
1955. Том 101, № 2

ФИЗИКА

С. Н. ЖУРКОВ и Т. П. САНФИРОВА

ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 3 I 1955)

Исследования временной зависимости прочности твердых тел, проведенные нами в последнее время ([1], [2]), указывают на важную роль фактора времени в механизме разрыва. Показано, что время разрыва τ, или, иначе, долговечность материала в напряженном состоянии, экспоненциально возрастает с уменьшением растягивающего напряжения σ и температуры T. Эти данные, а также результаты работ других авторов ([3–17]) привели нас к сомнению в правильности существующих представлений о прочности. Была высказана новая точка зрения, согласно которой разрыв рассматривается как кинетический процесс постепенного разрушения тела, находящегося под нагрузкой.

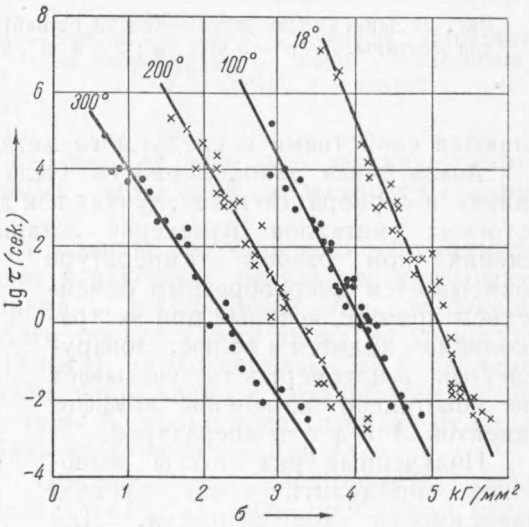


Рис. 1. Зависимость долговечности от напряжения для алюминия

Данная работа является дальнейшим развитием этих представлений и посвящена изучению долговечности чистых металлов в широком диапазоне температур и напряжений.

Опыты проводились с четырьмя поликристаллическими металлами: цинком (99,94%), алюминием (99,99%), серебром (99,95%) и платиной (99,92%). Временная зависимость прочности изучалась в условиях одноосного растяжения на плоских образцах в форме двойной лопатки, которые вырубались из металлического листа фигурным ножом. Длина однородной части равнялась 22 мм, ширина 1 мм, толщина 0,05—0,1 мм. Образцы перед испытанием отжигались в вакууме при температуре рекристаллизации в течение 20—40 мин.

В опытах измерялось время τ (в сек.), прошедшее от момента нагружения до разрыва образца, в зависимости от величины растягивающего напряжения σ (в кГ / мм²), рассчитанного на истинное сечение. Для поддержания постоянного напряжения при длительных испытаниях применялось специальное рычажное приспособление. При кратковременном нагружении измерение долговечности проводилось при помощи электродинамического копра с осциллографической регистрацией, позволявшего получать прямоугольный механический импульс.

Эти методы и приборы, подробно описанные в работе ([2]), позволили исследовать долговечность под нагрузкой в широком интервале времен, охватывающем почти 10 порядков — от тысячных долей секунды до 2—3 мес.

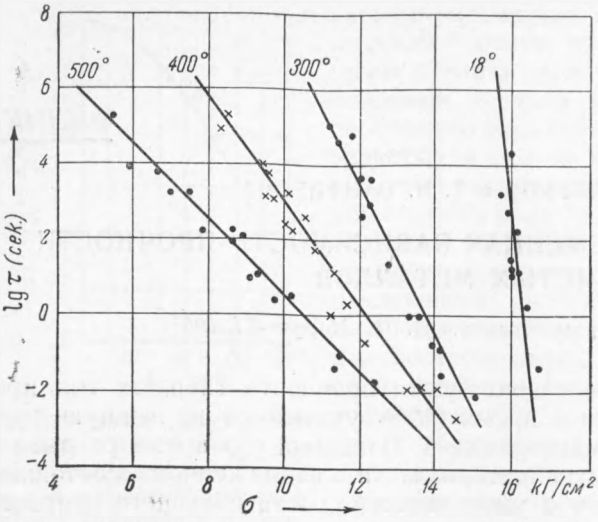


Рис. 2. Зависимость долговечности от напряжения для платины. *1* — σ = 3 кГ / мм²; *2* — 4 кГ / мм²; *3* — 5 кГ / мм²

Измеренные значения долговечности при заданной температуре наносились на график в виде зависимости $\lg \tau = f(\sigma)$. Как видно из рис. 1 и 2, результаты измерений для алюминия и платины во всем интервале исследуемых времен хорошо укладываются на прямые линии, отвечающие уравнению

$$\tau = Ae^{-\alpha\sigma} \quad (\text{при } T = \text{const}), \tag{1}$$

в котором коэффициенты A и α определяются свойствами исследуемого металла и температурой.

Аналогичная закономерность была найдена и для долговечности цинка и серебра. Во всех случаях как для благородных, так и для менее стойких металлов изменение логарифма долговечности от напряжения при разной температуре описывается веерообразным семейством прямых, которые при экстраполяции сходятся в полюс. Обнаруженная закономерность указывает на монотонное изменение коэффициентов A и α с температурой.

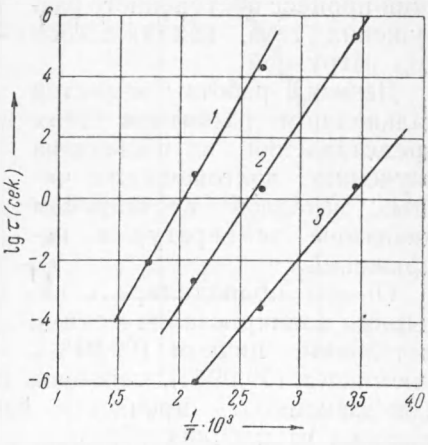


Рис. 3. Температурная зависимость долговечности при постоянном напряжении для алюминия

Полученные результаты позволяют определить температурную зависимость долговечности. Для этого по данным опыта (рис. 1 и 2) построим график изменения $\lg \tau$ от $1/T$ при фиксированной величине σ. Как видно из рис. 3, температурная зависимость долговечности алюминия для разных напряжений изображается семейством прямых, также сходящихся при экстраполяции в одну точку. Подобный результат был получен и для остальных трех исследованных металлов. Следовательно, долговечность металла, находящегося под действием растягивающего усилия при $\sigma = \text{const}$, аналитически может быть записана в виде $\tau = Be^{\beta/T}$. Введя в уравнение постоянную Больцмана k и обозначив произведение βk через U, получим выражение для температурной зависимости долговечности следующего вида:

$$\tau = Be^{U/kT} \quad (\text{при } \sigma = \text{const}), \tag{2}$$

в котором U имеет смысл энергии активации процесса разрушения. Для разных металлов найденные на опыте значения U колеблются в пределах нескольких десятков килокалорий на моль и по порядку величины совпадают с энергией активации процессов самодиффузии и испарения металлов.

Чтобы убедиться, действительно ли в теле, находящемся под нагрузкой, идут какие-то процессы, постепенное развитие которых приводит к потере прочности, или же время τ тратится на ожидание благоприятных условий, при которых наступает разрыв, были проведены опыты в два приема. По истечении времени $\tau_1 < \tau$ испытуемые образцы разгружались и в течение нескольких недель «отдыхали», после чего снова нагружались той же нагрузкой и измерялось время τ_2, необходимое для разрыва. Оказалось, что в пределах статистического разброса $\tau_1 + \tau_2 = \tau$. Следовательно, за первую часть опыта (τ_1) в образце произошли какие-то изменения, которые привели к тому, что долговечность (τ_2) таких предварительно находившихся под нагрузкой образцов сократилась, они как бы оказались частично разрушенными, причем никаких видимых нарушений целостности обнаружить не удается.

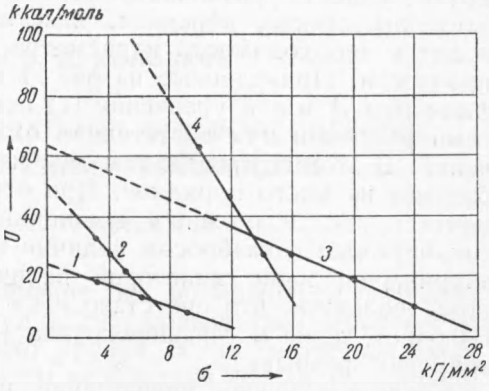


Рис. 4. Зависимость энергии активации от напряжения: *1* — цинк, *2* — алюминий, *3* — серебро, *4* — платина

Эти опыты ясно указывают на развитие в механически напряженном теле процесса, который приводит в конечном результате к разрыву. Время τ, необходимое для завершения этого процесса, как видно из уравнений (1) и (2), резко сокращается с увеличением напряжения и повышением температуры и, кроме того, зависит от величины энергии активации U.

Таблица 1

	U_0, ккал/моль	Q, ккал/моль	E, ккал/моль	A, ккал/моль [18]
Zn	25	27,4	20,5	—
Al	51	55	37,5	15,3
Ag	64	58	45,9 [18]	15,0
Pt	145	127	—	44,5

Приведенное на рис. 3 семейство прямых, наклон которых определяет величину U, показывает, что энергия активации процесса разрушения не остается постоянной, а закономерно возрастает по мере уменьшения растягивающего напряжения σ. Для изученных металлов эта зависимость хорошо передается отношением $U = U_0 - \gamma\sigma$ (см. рис. 4). Полагая, что это равенство справедливо и при малых σ, можно, экстраполируя найденные на опыте величины U к значениям $\sigma \to 0$, определить U_0, являющуюся энергетической константой процесса разрушения и зависящую только от свойства материала.

Чтобы понять физическую сущность разрушения, представлялось весьма интересным сопоставить для изученных металлов численные значения энергии U_0 с известными константами: энергией сублимации Q, энергией активации для самодиффузии E и энергией активации для установившегося процесса ползучести A.

Приведенные в табл. 1 величины показывают, что найденная из температурно-временной зависимости прочности энергия U_0 достаточно точно совпадает с энергией сублимации чистых металлов, что свидетельствует о тесной связи кинетики разрушения связи атомов в кри-

сталлической решетке. Этот результат, как нам кажется, позволяет понять процесс разрыва как постепенное нарушение межатомных связей, приводящее к образованию местных разрывов (трещин) и завершающееся в конечном счете разделением тела на части. К сожалению, детали этого механизма остаются пока невыясненными и требуют дальнейших исследований.

Временной характер прочности, который наблюдается для широкого круга веществ различного строения и физико-химических свойств (металлы, стекло, керамика, пластмассы, резина, дерево и др.), приводит к необходимости пересмотра установившегося понятия предела прочности. Приведенные на рис. 1 и 2 данные показывают, что коэффициенты A и α в уравнении (1) непрерывно возрастают с понижением температуры и при достаточном охлаждении достигают больших значений. В этом случае даже малые изменения напряжения меняют время разрыва на много порядков. При ограниченной длительности эксперимента предел возможных изменений σ становится достаточно узким и соизмеримым с разбросом величин прочности. Небольшое уменьшение напряжения ниже некоторой величины σ_1 делает время разрыва τ столь большим, что оно становится недоступным прямому измерению. Наоборот, даже малая перегрузка $(\sigma_1 + \Delta\sigma)$ приводит к очень малым временам разрыва.

Создается ложное впечатление, что образец рвется сразу, если напряжение достигло предела прочности, и сохраняется сколь угодно долго неразорванным при меньшей нагрузке. В действительности же, как было показано, наблюдается плавный переход от повышенной температуры, где изменения прочности от времени велики и легко обнаружимы на опыте, к более низкой температуре, при которой временная зависимость также имеет место, но благодаря резкому изменению τ от σ становится трудно измеримой. Это обстоятельство и привело к представлению о пределе прочности материала, не зависящему от времени воздействия напряжения. Очевидно, если разрыв есть непрерывно развивающийся процесс, то такое понятие о пределе теряет смысл и не может служить основой для понимания физической природы прочности. Наоборот, временные эффекты прочности, которые ранее рассматривались как побочные явления, приобретают принципиальное значение. В этом аспекте понятие о долговечности в напряженном состоянии или времени разрыва становится основной характеристикой прочности, а зависимость долговечности от напряжения, температуры, окружающей среды и других факторов — главным предметом исследований в этой области.

Ленинградский физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступило
22 XII 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] С. Н. Журков, Б. Н. Нарзуллаев, ЖТФ, **10**, 1677 (1953). [2] С. Н. Журков, Э. С. Томашевский, ЖТФ, **25**, 70 (1955). [3] G. Welter, Zs. Metallkunde, H. 3, 117 (1926). [4] Я. М. Пошак, Зав. лаб., **13**, 77 (1947). [5] М. И. Курманов, Р. С. Каплан, Зав. лаб., **8**, 975 (1950). [6] С. С. Шураков, ЖТФ, **24**, 527 (1954). [7] С. Т. Кишкин, ДАН, **95**, № 4, 789 (1954). [8] A. J. Holland, W. E. Turner, J. Soc. Glass. Techn., **24**, 46 (1940). [9] Г. М. Бартенев, ЖТФ, **21**, 579 (1951). [10] T. C. Baker, F. W. Preston, J. Appl. Phys., **17**, 170 (1946). [11] W. F. Busse, E. T. Lessing et al., ibid., **13**, 715 (1942). [12] R. N. Haward, Trans. Farad. Soc., **38**, 394 (1942); **39**, 267 (1943). [13] C. Garney, Z. Borysowski, Proc. Phys. Soc., **61**, 446 (1948). [14] В. Р. Регель, ЖТФ, **21**, 287 (1951). [15] Г. М. Бартенев, ДАН, **82**, 49 (1952). [16] Ф. П. Белянкин, Вісти. Укр. Акад. наук ССР, **7**, 93 (1931). [17] D. Mahnke, Zs. f. Phys., **90**, 177 (1934). [18] С. Д. Герцрикен, ДАН, **98**, 211 (1954). [19] S. Duchman, L. Dunbar, H. Huthsteiner, Appl. Phys., **15**, 108 (1944).