

УДК 538.67

© 1991

**О СУЩЕСТВОВАНИИ КОРРЕЛЯЦИИ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ**

В. А. Чураев

Сравнение температурных зависимостей механической прочности металлов и их электрического сопротивления показало наличие корреляции в изменении этих величин в области температур выше 20 °С. На основании этой корреляции получено выражение для изменения механической прочности металла в зависимости от температуры $\sigma = \sigma_0 (1 - \alpha T/2)$, где σ_0 — прочность при комнатной температуре, α — температурный коэффициент электрического сопротивления. Сравнение с зависимостями $\sigma(T)$ ряда металлов показало справедливость полученного соотношения.

Увеличение электрического сопротивления металлов ρ и уменьшение их механической прочности σ с ростом температуры T определяются общим фактором — увеличением амплитуды колебаний ионов решетки относительно положения равновесия. Представляет интерес определить корреляцию этих изменений.

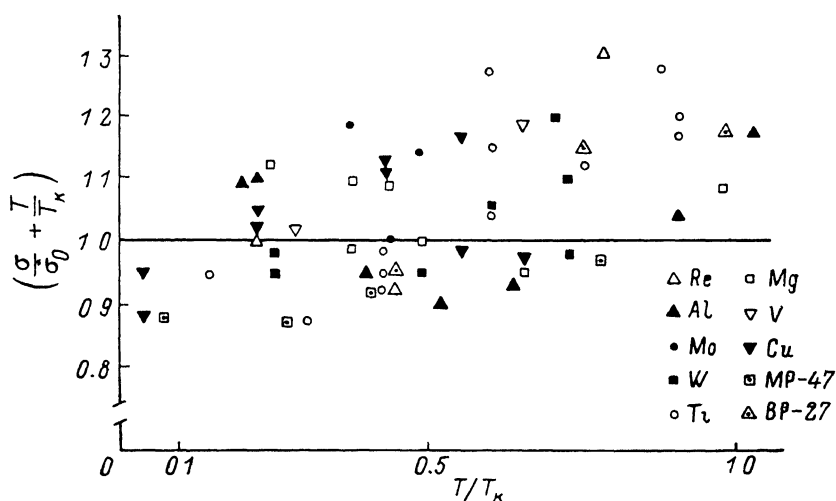


Рис. 1. Корреляция результатов вычисления зависимости $\sigma(T)$ для разных металлов.

Очевидно, что для этого достаточно определить температурные изменения σ и ρ . Для определения зависимости механической прочности σ от температуры воспользуемся кинетическим уравнением прочности [1, 2], которое может быть записано следующим образом:

$$U_0 = kT \ln(\tau/\tau_0) + \gamma\sigma, \quad (1)$$

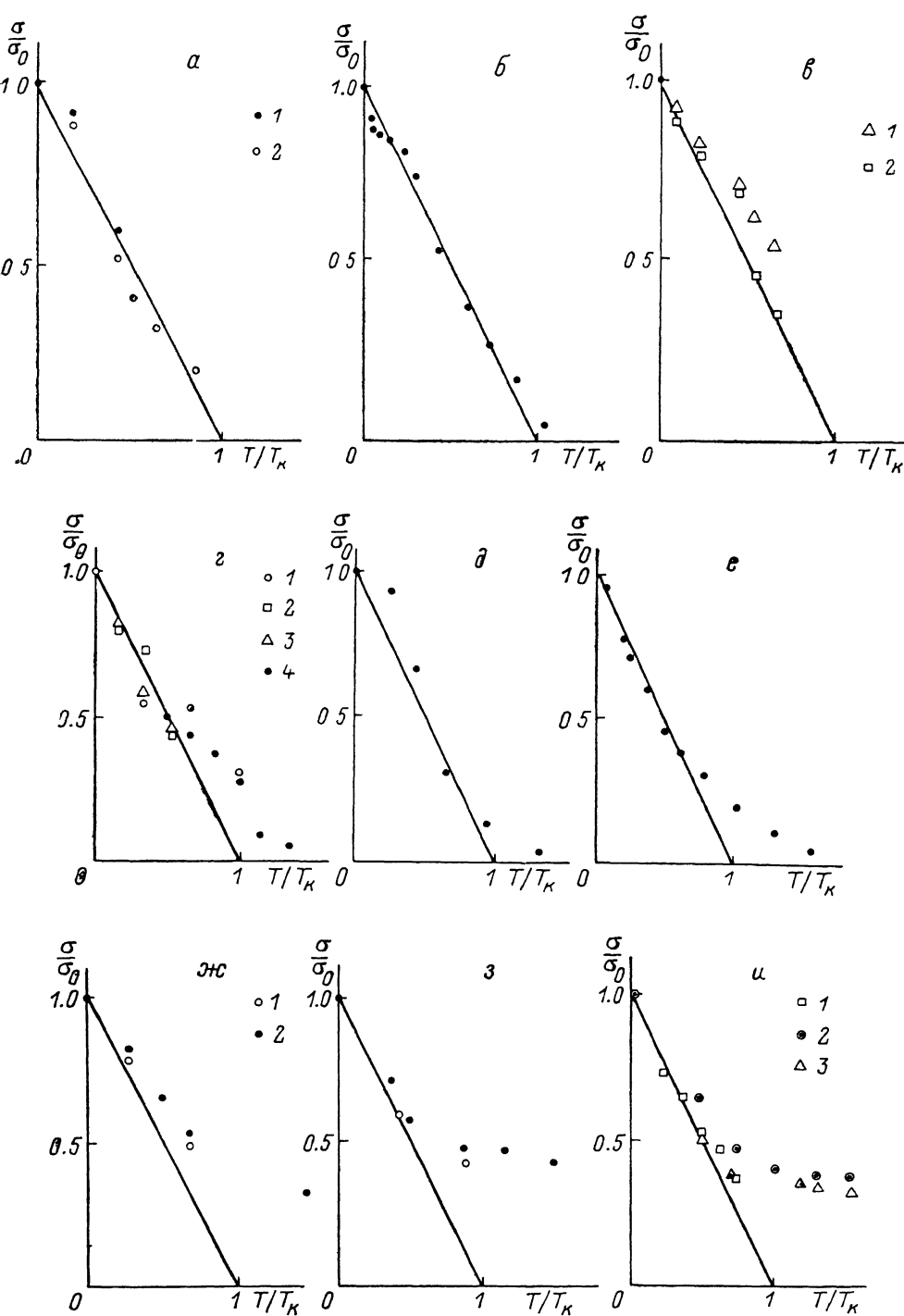


Рис. 2. Зависимости $\sigma(T)$.

а — алюминий, $T_K=470^\circ\text{C}$, $\sigma_0=146$ (1) и 90 МПа (2); б — сплав ВР-27, $T_K=2000^\circ\text{C}$, $\sigma_0=1250$ МПа; в — магний, $T_K=485^\circ\text{C}$, $\sigma_0=123$ МПа; г — титан, $T_K=606^\circ\text{C}$, $\sigma_0=240$ (1), 530 (2), 650 (3) и 970 МПа (4); д — магний, $T_K=485^\circ\text{C}$, $\sigma_0=123$ МПа; е — сплав МР-47, $T_K=1000^\circ\text{C}$, $\sigma_0=900$ МПа; ж — гафний, $T_K=540^\circ\text{C}$, $\sigma_0=440$ (1) и 550 МПа (2); з — молибден, $T_K=462^\circ\text{C}$, $\sigma_0=1510$ (1) и 650 МПа (2); и — вольфрам, $T_K=400^\circ\text{C}$, $\sigma_0=1500$ (1), 1470 (2) и 740 МПа (3); к — рений, $T_K=645^\circ\text{C}$, $\sigma_0=2320$ МПа; л — корреляция зависимостей а—к.

где U_0 — энергия межатомной связи, T — температура испытания, τ — его длительность, $\tau_0=10^{-13}$ с, σ — механическое напряжение, γ — активационный объем.

Изменение удельного электрического сопротивления в зависимости от температуры T описывается соотношением Блоха—Грюнайзена, которое при температурах $T_{н1} \gg T \gg \Theta$ может быть записано в виде

$$\rho \sim T/M\Theta^2, \quad (2)$$

M , Θ — масса иона и дебаевская температура.

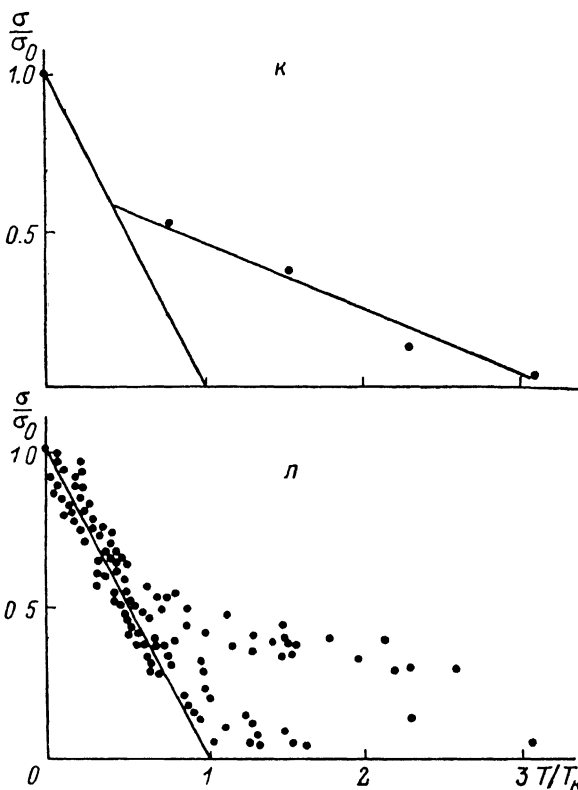


Рис. 2.

Сопоставляя (1) и (2), можно получить выражение $c_1=c_2\rho+\sigma$ или $\sigma=c_1-c_2\rho$, где c_1 , c_2 — некоторые константы, которые легко определить, так как $c_1=\sigma_0$ — прочности при $\rho=T=0$, а $c_2=\sigma_0/\rho_k$, где ρ_k — электрическое сопротивление при температуре T_k , когда механическую прочность σ можно считать равной нулю [1, 2]. В этом случае получаем зависимость $\sigma=\sigma_0(1-\rho/\rho_k)=\sigma_0(1-T/T_k)$, из которой следует, что $T_k=[(1/\rho_k)(\partial\rho/\partial T)]^{-1}=1/\alpha_k$, где α_k — температурный коэффициент электрического сопротивления в области температур возле $T=T_k$. Таким образом, в первом приближении можно считать, что зависимость $\sigma(T)$ имеет вид $\sigma=\sigma_0(1-T/T_k)=\sigma_0(1-\alpha_k T)$, где α_k — температурный коэффициент электрического сопротивления.

Сравнение этого выражения с имеющимися в литературе [3-7] экспериментальными данными по $\sigma(T)$ и $\rho(T)$ показало его справедливость для области температур от комнатной и выше при $\alpha_k=\alpha/2$, где α — температурный коэффициент электрического сопротивления, значения которого обычно приводятся в справочной литературе для этого же диапазона температур (рис. 1). При этом механическая прочность при $T=20^\circ\text{C}$ равна σ_0 , $T_k=2/\alpha$

$$\sigma=\sigma_0(1-\alpha T/2). \quad (3)$$

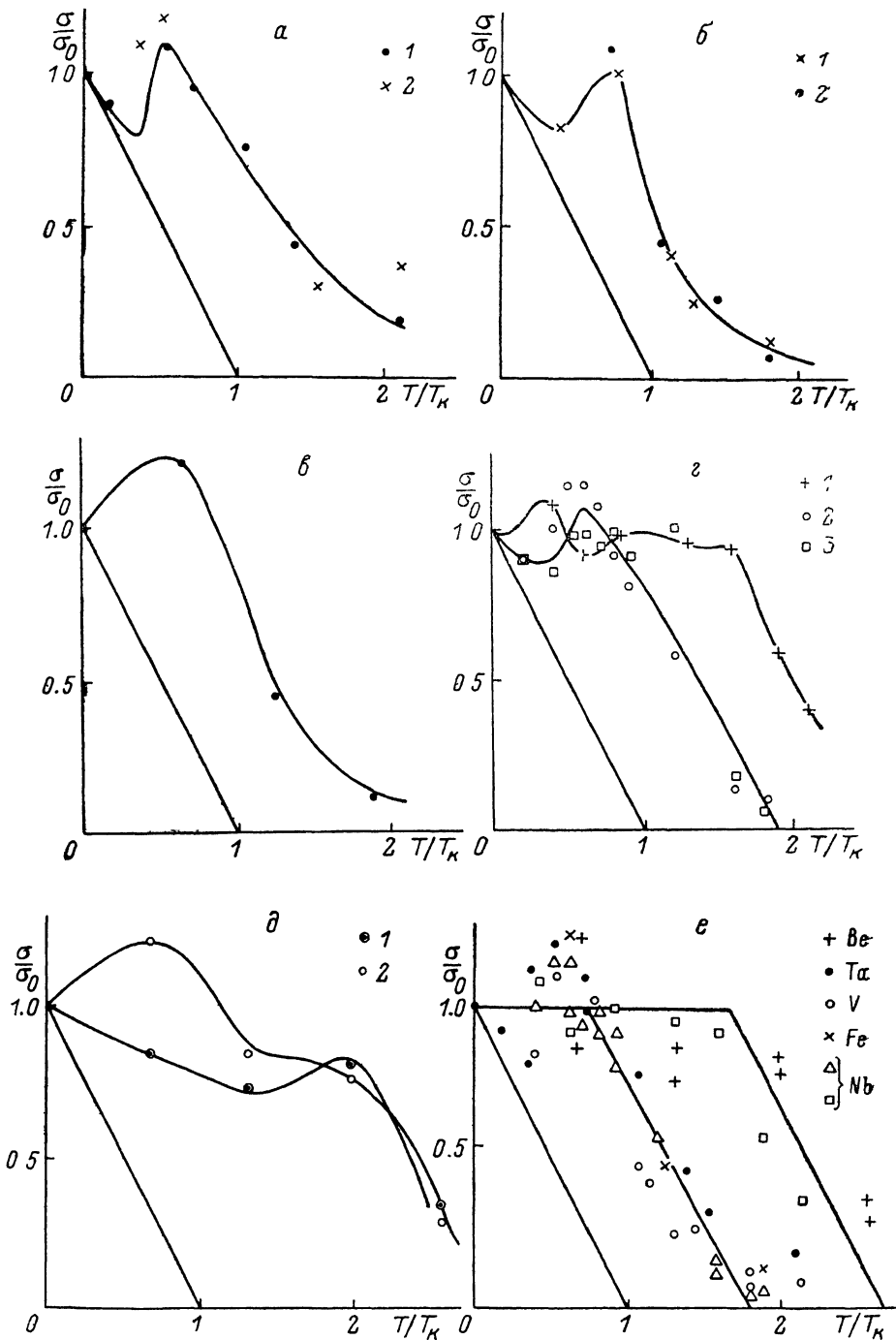


Рис. 3. Зависимость $\beta(T)$.

a — тантал, $T_K=576^\circ\text{C}$, $\sigma_0=190$ (1) и 460 МПа (2); *б* — ванадий, $T_K=556^\circ\text{C}$, $\sigma_0=410$ (1) и 626 МПа (2); *в* — железо, $T_K=320^\circ\text{C}$, $\sigma_0=410$ МПа; *г* — ниобий, $T_K=508^\circ\text{C}$, $\sigma_0=340$ (1), 412 (2) и 206 МПа (3); *д* — бериллий, $T_K=303^\circ\text{C}$, $\sigma_0=136$ (1) и 226 МПа (2); *е* — корреляция зависимостей рис *a*—*д*.

Зависимости $\sigma(T)$, построенные в координатах σ/σ_0 и T/T_k на основании данных, имеющих в литературе, приведены на рис. 2—4, откуда видно, что наблюдаются по крайней мере три характерных типа зависимостей $\sigma(T)$.

Первый тип зависимостей (рис. 2) для меди, алюминия, магния, сплава ВР-27ВП, большей части зависимости $\sigma(T)$ сплава МР-47ВП, а также низкотемпературной части зависимостей вольфрама, молибдена, гафния и титана в достаточной степени соответствует выражению (3). При этом интересно отметить, что у тугоплавкого и прочного сплава ВР-27ВП зависимость имеет такой же вид, как у легкоплавких Al, Cu, Mg. Его «тугоплавкость» в данном случае выражается в высокой температуре $T_k = 2000^\circ\text{C}$ (что следует из малой величины $\alpha = 1 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$).

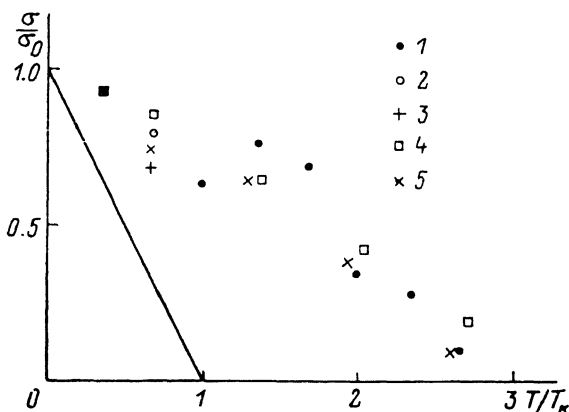


Рис. 4. Зависимость $\sigma(T)$.

1 — нобальт; 2, 3 — железо; 4 — никель; 5 — бериллий. T_k ($^\circ\text{C}$), σ (МПа): 1 — 303, 130; 2 — 320, 120; 3 — 320, 90; 4 — 298, 430; 5 — 303, 430.

Второй тип зависимости $\sigma(T)$ наблюдается у таких металлов, как Ta, Nb, V, Fe, Be (рис. 3). Их особенность заключается в сдвиге температуры начала снижения прочности на некоторую ΔT , кратную величине, близкой к T_k . Так, у Ta и V, а в некоторых случаях у Fe и Nb прочность практически не зависит от температуры вплоть до $T \sim T_k$, а затем снижается с наклоном, соответствующим (3). У литого, выдавленного бериллия и прокатанного в тонкий лист ниобия наблюдается еще больший сдвиг до $T \sim 2T$.

Третий тип зависимости $\sigma(T)$ наблюдается в некоторых случаях у Ni, Be, Fe и Co (рис. 4), у которых уменьшение прочности происходит практически линейно, но в три раза медленнее, чем по (3).

Таким образом, анализ общеизвестных данных по зависимостям механической прочности металлов от температуры показал, что для большого числа металлов наблюдается корреляция в изменениях ρ и σ от температуры, выражающаяся зависимостью (3).

Список литературы

- [1] Регель В. Р., Слущер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., 1974.
- [2] Журков С. Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел. Физика прочности и пластичности. Л., 1986.
- [3] Свойства элементов. Справочник. Т. 1. М., 1976.
- [4] Электротехнический справочник. Т. 1. М., 1962.
- [5] Соколов Л. Д. и др. Механические свойства редких металлов. М., 1972.
- [6] Сб. «Рений». М., 1964.
- [7] Сплавы рения. М., 1965.