

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

М. Ю. БАЛЬШИН

**ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ  
МЕТАЛЛОВ ОТ ПОРИСТОСТИ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА  
ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

(Представлено академиком И. П. Бардиным 15 VI 1949)

1. В основу теории механических свойств пористых металлокерамических материалов автор положил следующие основные предположения.

а) Свойства пористых металлокерамических материалов определяются размером наиболее слабого сечения. По большей части таким наиболее слабым сечением порошкового металла является так называемое „контактное сечение“, т. е. сечение ломаной поверхностью, проходящее целиком через поры (размер этой части сечения не учитывается) и контактные участки (<sup>1, 2</sup>).

б) Величина показателей прочности, отнесенных к контактному сечению, в первом приближении является константой материала, не зависящей от его пористости, т. е.

$$\sigma / \alpha = \sigma_k = \text{const}, \quad (1)$$

$$S / \alpha_k = S_k = \text{const}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — доля, занимаемая исходным (до испытания) контактными (наименьшим) сечением, по отношению к исходному номинальному сечению;  $\alpha_k$  — доля, занимаемая конечным (истинным) контактными сечением, по отношению к истинному номинальному сечению;  $\sigma$  — показатель прочности, отнесенный к исходному;  $S$  — показатель прочности, отнесенный к истинному номинальному сечению;  $\sigma_k$  и  $S_k$  — соответствующие показатели прочности, отнесенные к исходному и истинному контактными сечениями.  $\sigma_k$  и  $S_k$  являются константами лишь в той степени, в которой они не зависят от упрочнения. Поэтому формулы (1) и (2) действительны в сравнительно узких интервалах значений  $\alpha$ .

в) Деформация порошкового металла  $d\varepsilon$  в первом приближении пропорциональна изменению напряжения на единицу контактного сечения  $dS_k$ :

$$dS_k = \frac{dS}{\alpha} = \pm k d\varepsilon, \quad (3)$$

где  $k$  — постоянный коэффициент пропорциональности. Эта закономерность действительна как по отношению к упругим, так и пластическим деформациям (в последнем случае с поправками на упрочнение в процессе пластической деформации).

На основании формул (2) и (3) и соответствующей поправки на упрочнение автор уже вывел ранее (<sup>1, 2</sup>) формулы зависимости между

давлением прессования и пористостью (плотностью) порошкового металла:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = m \frac{d\vartheta}{\vartheta}, \quad (4)$$

$$\ln \sigma = m \ln \vartheta + \ln \sigma_{\max}, \quad (4a)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = \vartheta^m, \quad (4б)$$

где  $\vartheta$  — относительная плотность порошкового металла;  $\sigma$  — номинальное напряжение прессования, соответствующее плотности  $\vartheta$ ;  $\sigma_{\max}$  — номинальное напряжение прессования при  $\vartheta = 1$  ( $\vartheta = 100\%$ ), приблизительно равное контактному напряжению прессования  $\sigma_k$ ,  $m = \text{const}$ .

Заметим, что давление прессования можно рассматривать как показатель прочности, так как оно равно сопротивлению материала обжатию при данной плотности  $\vartheta$ . Из формулы (1) следует, что  $d\sigma/\sigma = d\alpha/\alpha$ , откуда

$$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = \alpha = \vartheta^m, \quad (5)$$

где  $\alpha_{\max} = 1$  есть доля контактного сечения при  $\vartheta = 1$ . Таким образом, зависимость контактного сечения от пористости подчиняется такой же закономерности, как и давление прессования. В соответствии с формулами (1) и (2) любой показатель прочности подчиняется той же зависимости, что и  $\alpha$  (так как  $d\sigma/\sigma = d\alpha/\alpha$  и  $dS/S = d\alpha/\alpha$ ), поэтому формула (4) действительна не только для давления прессования, но и для любого показателя прочности неспеченного порошкового металла и модулей упругости, отнесенных к номинальному сечению. Следует, однако, подчеркнуть, что вследствие упрочнения значения  $m$  для различных показателей прочности не одинаковы и не совпадают со значением  $m$  по формуле (5).

Рис. 1 показывает на примере неспеченной электролитической меди справедливость формулы (4) для зависимости давления прессования  $p$  и механических свойств (твердости по Бринеллю  $H_B$ , предела текучести при сжатии  $\sigma_s$  и модуля упругости  $E$ ) от плотности  $\vartheta$  (линейная зависимость логарифма свойств от  $\lg \vartheta$  в соответствии с формулой (4)).

2. Спекание можно рассматривать как процесс сжатия порошкового металла под действием межуатомных сил. Поэтому мы вправе ожидать для спеченного порошкового металла такой же зависимости показателей прочности от  $\vartheta$ , как и для спрессованного, но неспеченного порошкового металла (но с другими значениями величины  $m$ ). Рис. 2 на примере спеченной меди ( $750^\circ$ , 1 ч. 30 мин.) показывает, что зависимость по формуле (4) имеет место не только для показателей прочности ( $H_B$ ,  $\sigma_b$  и  $\sigma_s$ ) и модуля упругости  $E$ , но и для показателей пластичности (удлинение  $\delta$ ). Для удлинения зависимость от плотности по типу формулы (4) была впервые эмпирически установлена И. М. Федорченко, В. Г. Филимоновым и М. Г. Грабино (4). Следует отметить, что такого рода зависимость для показателей плотности нельзя вывести из формул (1), (2), (3). По всей видимости зависимость этого типа для показателей пластичности основана на различии значений  $m$  для  $\sigma_b$  и  $\sigma_s$ . Экстраполированные по кривым  $\lg \sigma_b - \lg \vartheta$  значения  $\sigma_{b \max}$  близки к значениям  $\sigma_b$  для компактных литых металлов после обработки давлением и отжига (обычно несколько больше их).

3. Наши исследования показали, что значения  $m$ , в соответствии с формулой (4), для зависимости  $\sigma_b$  спеченных металлокерамических

материалов от  $\vartheta$  колеблются приблизительно в пределах от 3 до 6 в зависимости от характеристик исходных порошков и режима технологии (температура и время спекания и т. п.). При оптимальной технологии отношение  $\alpha$  контактного сечения к номинальному приближается к предельным равновесным для данной степени пористости значениям.

В соответствии с этим и значения  $\sigma_b$  (и других механических свойств) также приближаются при оптимальной технологии

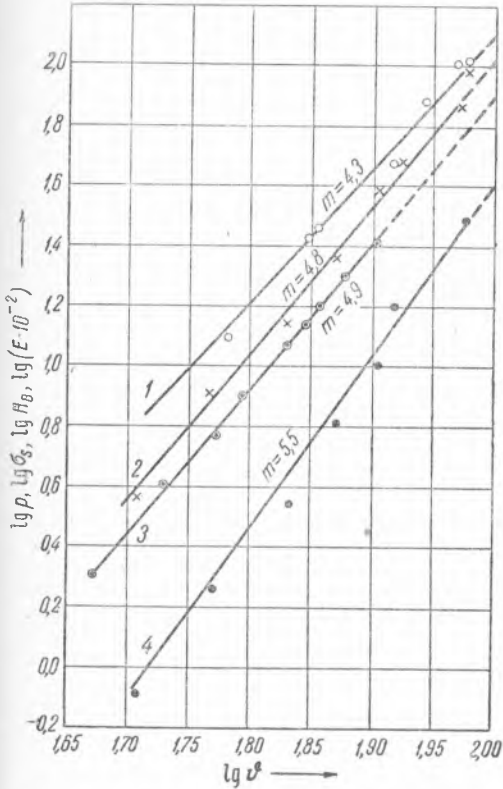


Рис. 1. 1 —  $H_B$  ( $H_{B \max} = 120$  кг/мм<sup>2</sup>); 2 —  $E$  ( $E_{\max} = 10300$  кг/мм<sup>2</sup>); 3 —  $p$  ( $p_{\max} = 80$  кг/мм<sup>2</sup>); 4 —  $\sigma_s$  ( $\sigma_{s \max} = 40$  кг/мм<sup>2</sup>)

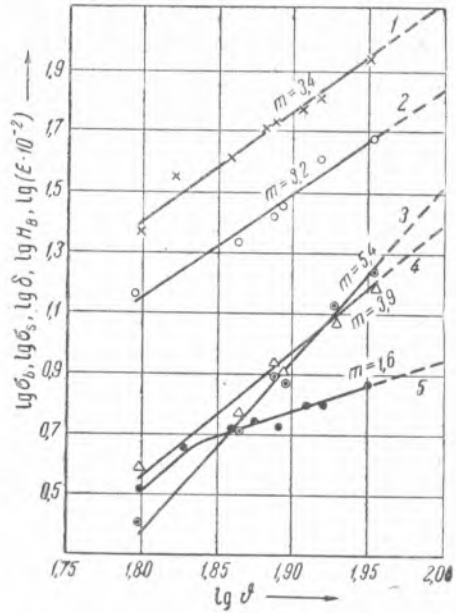


Рис. 2. 1 —  $E$  ( $E_{\max} = 13100$  кг/мм<sup>2</sup>); 2 —  $H_B$  ( $H_{B \max} = 68$  кг/мм<sup>2</sup>); 3 —  $\delta$  ( $\delta_{\max} = 33\%$ ); 4 —  $\sigma_b$  ( $\sigma_{b \max} = 24$  кг/мм<sup>2</sup>); 5 —  $\sigma_s$  ( $\sigma_{s \max} = 8,7$  кг/мм<sup>2</sup>)

к некоторому предельному „потолку“. Нами установлено, что в этом предельном случае значения показателя степени  $m$  в формуле (4) близки к 3, т. е.

$$\sigma_{bn} = \sigma_{bk} \vartheta^3, \quad (6)$$

где  $\sigma_{bn}$  — высшее предельное значение предела прочности при растяжении ненаклепанного пористого металла с плотностью  $\vartheta$ , которое можно получить при оптимальной технологии;  $\sigma_{bk}$  — предел прочности при растяжении компактного литого металла (после обработки давлением и отжига).

В табл. 1 сравниваются высшие предельные значения  $\sigma_{bn}$  различных пористых металлов, полученные разными авторами, с расчетными значениями по формуле (6). Как видно из табл. 1, расчетные значения  $\sigma_{bn}$  по формуле (6) близки к найденным экспериментально.

Таблица 1

Металл	$\sigma_{bl}$ в кг/мм <sup>2</sup>	$\eta$ в %	$\sigma_{bl}$ в кг/мм <sup>2</sup>		Источник
			по формуле (6)	экспер.	
Железо электролитическое . . . . .	30	76,3	13,3	14,1	(3)
» » . . . . .	30	85,9	19,0	21,9	(3)
Железо вихревое . . . . .	30	70	10,3	9,0	(4)
» » . . . . .	30	85	18,1	19,0	(4)
Железо восстановленное . . . . .	30	81	16,0	15,5	(4)
» распыленное . . . . .	30	70,2	10,4	8,0	(5)
» » . . . . .	30	88,7	20,9	21,9	(5)
Медь электролитическая . . . . .	22	61,2	5,1	4,4	собств. данные
» » . . . . .	22	85,1	13,5	14	(6)
Бронза оловянистая с 8% Sn . . . . .	30	50	3,75	3,5	(7)
» » » 10% Sn . . . . .	20	75	13,0	13,0	(7)
Нержавеющая сталь с 18 % Cr и 8% Ni . . . . .	60	47,6	6,5	5,3	(8)
То же . . . . .	60	86,0	38,2	39,0	(8)
Сплав с 65% Ni, 30% Mo, 5% Fe . . . . .	90	54,7	14,8	15,4	(9)
То же . . . . .	90	74,0	36,5	33,6	(8)

Институт металлургии  
им. А. А. Байкова  
Академии Наук СССР

Поступило  
31 V 1949

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> М. Ю. Бальшин, Порошковое металлостроение, 1948. <sup>2</sup> М. Ю. Бальшин, Порошковая металлургия, 1948. <sup>3</sup> A. Squire, Powder Metallurgy, Brooklyn, 1947. <sup>4</sup> И. М. Федорченко, В. Г. Филимонов и М. Г. Грабино, Вестн. машиностр., № 8, 35 (1947). <sup>5</sup> R. Kieffer u. W. Hötter, Sintereisen und Sinterstahl, Wien, 1948. <sup>6</sup> C. Goetzl, статья в книге J. Wulff, Powder Metallurgy, Cleveland Ohio, 1942. <sup>7</sup> М. Ю. Бальшин и М. Ф. Бессуднова, Справочник машиностроения, 4, 1947. <sup>8</sup> P. Duwez and H. E. Martens, Met. Technol., IV (1948).