

М.Ю. Бальшин

**Научные основы порошковой
металлургии и металлургии
волокна**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 62-63
ББК 30.6
М11

М11 **М.Ю. Бальшин**
Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М.Ю.
Бальшин – М.: Книга по Требованию, 2021. – 336 с.

ISBN 978-5-458-28064-8

ISBN 978-5-458-28064-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ¹

- a — показатель степени в некоторых формулах;
 a_k — ударная вязкость пористого тела;
 $(a_k)_k$ — ударная вязкость компактного тела;
 A — контактное сечение (размерность L^2);
 $A_{\perp}, A_{\parallel}$ — величины контактного сечения в направлениях, перпендикулярном и параллельном направлению нагрузки (размерность L^2);
 A' — поверхность соприкосновения (контактная поверхность) (размерность L^2);
 $A_{уд}$ — ударная вязкость, отнесенная ко всей площади сечения образца;
 α — безразмерное контактное (критическое) сечение; безразмерная активная доля объема пористого тела, в которой концентрируются направленные напряжения или процессы;
 $\alpha_{\perp}, \alpha_{\parallel}$ — величины безразмерного контактного (критического) сечения в перпендикулярном и параллельном направлениях к направлению приложения нагрузки;
 α_0 — исходное значение α при $\vartheta = \vartheta_0$;
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_I$ — различные значения критического сечения α ;
 $\alpha_{ср}, \alpha_{min}$ — среднее и минимальное значение α , для параллельных критических сечений одного и того же тела;
 $\alpha_{\sigma}, \alpha_{\rho}, \alpha_E$ — величина безразмерного критического сечения α , определенного соответственно по прочности, электросопротивлению и модулю упругости;
 $\alpha_{ис}, \alpha_{ост}$ — исходное (до снятия давления) и остаточное (после снятия) значения критического сечения α ;
 $\alpha_{и}$ — величина α при изостатическом уплотнении;
 $\alpha_{ед}$ — величина единичного безразмерного контактного сечения, т. е. величина отноше-

¹ Расшифровка некоторых редко встречающихся условных буквенных обозначений дана в тексте книги. Эквивалентные синонимы понятней, обозначающиеся одной и той же буквой, также приведены в тексте книги,

ния площади проекции единичного индивидуального контакта одной частицы к площади проекции всей частицы и принадлежащего ей ареала пор (берется плоскость, перпендикулярная направлению нагрузки);

$(\alpha_{ед})_{\perp}, (\alpha_{ед})_{\parallel}$ — величина единичного безразмерного контактного сечения в направлениях, перпендикулярном и параллельном направлению нагрузки;

$(\alpha_{ед})_1, (\alpha_{ед})_2, (\alpha_{ед})_3$ — величины различных единичных безразмерных контактных (критических) сечений $\alpha_{ед}$;

b — показатель степени в некоторых формулах;

β — относительный объем (отношение объема пористого тела к объему его твердой фазы), $\beta = 1/\theta$;

β_0 — значение исходного относительного объема β ;

β_1, β_2 — различные значения β ;

c — показатель степени в некоторых формулах;

$c_{\parallel}$ и $c_{\perp}$ — значения c для функций, параллельных и перпендикулярных давлению прессования;

c_d и c_k — значение c при диффузионном квазивязком течении;

C_p, c_p — теплоемкость соответственно моля и единицы массы пористого тела;

d — диаметр волокна;

D — диаметр пористого тела;

D_0 — исходное значение D ;

$\Delta D/D_0, \Delta h/h_0, \Delta L/L_0, \Delta V/V_0$ — относительные изменения размеров пористого тела по D, h (высоте), L (длине), V (объему) в результате упругого последствия или усадки;

$(\Delta D/D_0)_{\parallel}, (\Delta h/h_0)_{\parallel}, (\Delta L/L_0)_{\parallel}, (\Delta V/V_0)_{\parallel}$;

$(\Delta D/D_0)_{\perp}, (\Delta h/h_0)_{\perp}, (\Delta L/L_0)_{\perp}, (\Delta V/V_0)_{\perp}$;

$(\Delta D/D_0)_{\text{н}}, (\Delta h/h_0)_{\text{н}}, (\Delta L/L_0)_{\text{н}}, (\Delta V/V_0)_{\text{н}}$ — соответственно чисто упругие (обратимые) и необратимые составляющие упругого последствия;

δ, δ_k — удлинения пористого и компактного тела;

E, E_k — модули упругости пористого и компактного тела;

$E_{\text{стат}}, E_{\text{дин}}$ — статический и динамический модули упругости пористого тела;

$E_{\perp}, E_{\parallel}$ — модули упругости пористого тела в направлениях, перпендикулярном и параллельном давлению прессования;

ε — относительная деформация;
 $\varepsilon_{об}$ — объемная упругая деформация (относительная);
 $\varepsilon_{л}$ — линейная упругая деформация;
 $\varepsilon_{т}$ — линейная деформация при достижении предела текучести $\sigma_{т}$;
 $\varepsilon_{у}$ — линейная деформация при достижении предела упругости $\sigma_{у}$;
 $\varepsilon_{п}$ — линейная деформация при достижении предела пропорциональности $\sigma_{п}$;
 $\varepsilon', \varepsilon'_k$ — диэлектрическая постоянная пористого и компактного тела;
 f_k — компонент напряжения контактного трения в направлении действия нагрузки;
 F — сила;
 G — модуль сдвига пористого тела (инерционный);
 G' — модуль сдвига пористого тела (контактный);
 G_k — модуль сдвига компактного тела;
 γ — поверхностное натяжение (поверхности я энергия);
 $\gamma_{гр}$ — пограничное натяжение (погранич энергия);
 Γ, Γ_k — плотность пористого и компактного тела;
 $\bar{h}$ — высота тела;
 $h_k = h\bar{\theta}$ — приведенная высота пористого тела;
 $HВ, HВ', H_k$ — твердость компактного тела, соответственно по Бринелю, Викерсу или кон-
 тактная;
 H_0 — кратковременная горячая твердость компактного тела;
 H'_0 — кратковременная горячая твердость пористостью автономного единичного контакта в пористом теле, $H' = (\rho_k)_{\theta}$;
 η — коэффициент вязкости;
 $\eta_{и}$ — инертная доля объема или сечения твердой фазы пористого тела по отношению ко всему объему или сечению этого тела;
 $\bar{\theta}$ — относительная плотность;
 $\bar{\theta}_0$ — исходное значение $\bar{\theta}$;
 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2$ — различные значения $\bar{\theta}$;
 $\bar{\theta}$ — безразмерная доля $\theta \leq 1$;
 θ_1, θ_2 — различные значения θ ;
 k, k_1, k_2, k', K } — постоянные коэффициенты;
 $k_p, (k_p)_k$ — коэффициенты термического расширения тела в пористом и компактном состояниях;
 K — модуль всестороннего сжатия пористого тела (инерционный);
 K' — модуль всестороннего сжатия пористого тела (контактный);

- K_k — модуль всестороннего сжатия компактного тела;
 l — фактический (кратчайший) путь процесса в пористом теле, также фактическая длина волокна и некоторый линейный параметр;
 l_k — номинальная кратчайшая длина пути процесса в пористом теле;
 L — длина пористого тела, L_0 — его исходная длина;
 λ, λ_k — удельная электропроводность пористого и компактного тела;
 λ_t, λ_{tk} — коэффициент теплопроводности пористого и компактного тела;
 m — показатель степени в различных формулах;
 $m_{\parallel}$ и $m_{\perp}$ — показатели степени для функций, параллельных и перпендикулярных направлению давления прессования;
 M — показатель степени в некоторых формулах;
 μ — коэффициент трения;
 n — показатель степени в различных формулах;
 $n_{от}, n_1$ — число отрезков волокна на единицу площади и на единицу длины;
 $n_e, (n_e)_k$ — число колебаний в пористом и в компактном теле, при котором их первоначальная амплитуда уменьшается в e раз;
 $\left. \begin{matrix} (n_e)_{kн} \\ (n_e)_{кр} \end{matrix} \right\}$ — расчетные значения $(n_e)_k$ по различным формулам;
 N — количество уплотняющих ударов (циклов) при динамическом прессовании;
 N_k — количество ударов (циклов) при динамическом прессовании до полного уплотнения ($\vartheta=1$);
 ν — коэффициент Пуассона пористого тела (инерционный);
 ν' — коэффициент Пуассона пористого тела (контактный);
 ν_k — коэффициент Пуассона компактного тела;
 $\nu_{пл}$ — коэффициент Пуассона пористого тела в области пластической деформации;
 $(\nu_k)_{пл} = 0,5$ — коэффициент Пуассона компактного тела в области пластической деформации;
 $(\nu_{уп}), (\nu_{уп})_k$ — значения коэффициента Пуассона в упруго-пластичной области для пористого и компактного тела;
 p — номинальное давление прессования (нагрузка, отнесенная к номинальному сечению пористого тела);

- p, p — номинальное давление прессования в направлениях, параллельном и перпендикулярном нагрузке прессования;
- p_1, p_2, p_3 — различные значения p ;
- $p_{расч}$ — расчетные значения p ;
- $p_{эксп}$ — экспериментальные значения p ;
- $p_{об}$ — номинальное обратимое давление прессования в чисто упругой области напряжений;
- $p_{п}$ — постоянное давление при спекании под давлением;
- $p_{мз}$ — межзеренное давление, обусловленное пограничным натяжением $\gamma_{гг}$;
- p_{max} и p_l — экстраполированное максимальное давление прессования в точке $\alpha=1, \phi=1$ соответственно для тел из порошков и из волокна;
- $p_{кап}$ — капиллярное суммарное давление в порошковом теле;
- p_n — нетто-давление, величина p при равнотности и отсутствии потерь на внешнее трение;
- $(p_k)_n$ — контактное (критическое) нетто-давление;
- Δp_T — компонент давления, затрачиваемый на преодоление внутреннего трения;
- $(\Delta p_k)_T \approx 2\nu p_k \approx 2\nu' p_k$ — компонент контактного давления p_k , затрачиваемый на преодоление внутреннего трения и контактного взаимодействия;
- Δp_m — компонент давления p , затрачиваемый на преодоление внешнего трения (частиц с матрицей);
- $p_{mk} = \Delta p_{km}$ — соответствующий компонент контактного давления;
- $p_k = p/\alpha$ — критическое (контактное) давление прессования;
- $(p_k)_0 = p_k(1-2\nu) \approx \sigma_k$ — эффективное контактное (критическое) давление прессования, рассчитанное по инерционному коэффициенту Пуассона ν ;
- $(p'_k)_0 = p_k(1-2\nu') \approx \sigma_k$ — эффективное контактное (критическое) давление прессования, рассчитанное по контактному коэффициенту Пуассона ν' ;
- Δp_c — сверхдавление;
- $(\Delta p_k)_c$ — контактное (критическое) сверхдавление;
- $(\Delta p_c)_1$ — сверхдавление первого рода (при неравномерности);
- $(\Delta p_c)_п$ — пакетное сверхдавление;
- $(\Delta p_c)_с$ — структурное сверхдавление;
- P — сжимающая нагрузка;

- $\dot{P}(\alpha), P(\dot{\phi}), P(\omega)$ и др. } — вероятность того, что эти функции имеют значения $\alpha, \dot{\phi}, \omega$ и т. п.;
 $P = 1 - \dot{\phi}$ — пористость;
 $P_0 = 1 - \dot{\phi}_0$ — исходная пористость при $\alpha \rightarrow 0, p \rightarrow 0$;
 q, q' — знаменатели геометрической прогрессии;
 Q^{-1}, Q_K^{-1} — логарифмический декремент затухания пористого и компактного тела;
 $(Q_K^{-1})_n, (Q_K^{-1})_p$ — логарифмический декремент затухания тела, доведенного до компактного состояния, вычисленный на основе различных формул;
 $Q_{пл}$ — скрытая теплота плавления;
 $Q_{гр}$ — энергия на границах зерен;
 r_α, r_ϕ — условные безразмерные радиусы среднего единичного контактного сечения частиц и среднего номинального сечения частиц для инерционного коэффициента Пуассона. В этом случае $\pi r_\phi^2 = \dot{\phi}, \pi r_\alpha^2 = \alpha$,
 $r_\alpha / r_\phi = \xi = \sqrt{\alpha / \dot{\phi}}$;
 r'_α, r'_ϕ — условные радиусы среднего единичного контактного сечения частиц и среднего сечения соприкосновения частиц для контактного коэффициента Пуассона. В этом случае $\pi (r'_\phi)^2 = 1, \pi (r'_\alpha)^2 = \alpha$,
 $r'_\alpha / r'_\phi = \xi' = \sqrt{\alpha}$;
 R — радиус частицы;
 ρ, ρ_K — удельное электрическое сопротивление пористого и компактного тела;
 $\xi = v/v_K = \sqrt{\alpha / \dot{\phi}}$ — безразмерное значение инерционного коэффициента Пуассона;
 $\xi' = v/v_K = \sqrt{\alpha}$ — безразмерное значение контактного коэффициента Пуассона;
 ξ_b и ξ_{bK} — коэффициенты бокового давления пористого и компактного тела;
 $\xi_{пл} = 0,5$ $v_{пл}$ — безразмерное значение коэффициента Пуассона в области пластической деформации;
 S, S_K — некоторое свойство тела в пористом и компактном состоянии;
 $S_{||}, S_{\perp}$ — значение S в направлениях, параллельном и перпендикулярном давлению прессования;
 $S_{эксп}$ — экспериментальное значение S ;
 $S_{расч}$ — расчетное значение S ;
 σ — номинальное напряжение в пористом теле;
 $\sigma_K = \rho_K - f_K$ — критическое (контактное) напряжение;

- σ_a — предел прочности при растяжении пористого тела;
- $(\sigma_b)_k$ — предел прочности при растяжении компактного тела;
- σ_T — предел текучести пористого тела;
- $(\sigma_T)_k$ — предел текучести компактного тела;
- σ_n — предел пропорциональности пористого тела;
- $(\sigma_n)_k$ — предел пропорциональности компактного тела;
- σ_y — предел упругости пористого тела;
- $(\sigma_y)_k$ — предел упругости компактного тела;
- $(\sigma_k)_{пр}$ — предел теоретической прочности материала в компактном состоянии;
- $\sigma_k (1 - 2\nu)$ — эквивалентное (приведенное) значение предела текучести компактного тела;
- $\sigma_{кап}$ — капиллярное давление в единичной частице или поре;
- t — время выдержки при изотермическом спекании или нагреве;
- t_0 — эквивалентное время выдержки, учитывающее начальный период спекания (быстрый подъем температуры и давления);
- t_k — экстраполированное время выдержки для полного спекания;
- τ_k — контактное касательное напряжение трения;
- u — показатель степени в некоторых формулах;
- v, v_k — скорости процесса в пористом и компактном теле;
- $v_{\parallel}, v_{\perp}$ — скорости процесса в направлениях, параллельном и перпендикулярном направлению давления прессования;
- V — объем;
- w — приведенная работа прессования (для объема частиц, равного единице при $\phi=1, \beta=1$);
- w_{max}, w_k — приведенная работа прессования при полном уплотнении (до $\phi=1$);
- w_n — приведенная нетто-работа прессования;
- Δw_c — затраты работы на внутреннее трение (и, следовательно, изменение структуры частиц и сверхдавление);
- Δw_k — дополнительная работа контактного взаимодействия и трения;
- Δw_m — затрата работы на внешнее трение (с матрицей) при статическом и динамическом прессовании;
- $w_{эксп}$ — экспериментальное значение w ;
- $w_{расч}$ — расчетное значение w ;
- w_1 — приведенная работа деформации на один цикл при динамическом прессовании;

- ψ_y — приведенная работа упругой деформации при статическом и динамическом прессовании;
- $(\psi_y)_k$ — то же при $\phi = 1$;
- ω_{1y} — приведенная работа упругой деформации на один удар (один цикл) при динамическом прессовании;
- $\omega_{об}$ — работа обратимой деформации пористого тела на единицу номинального объема;
- $(\omega_{об})_k$ — то же при $\phi = 1$;
- ω_n — затрата приведенной работы при динамическом прессовании на демпфирование колебаний в прессформе и инструменте;
- ω_{1n} — то же, что и ω_n , но на один удар (один цикл);
- ω_{1m} — затрата работы на один удар (один цикл) при динамическом прессовании на трение с матрицей;
- $\omega_{м.д.} (\omega_{м.д.})_k$ — работа упругой деформации единицы массы для пористого и компактного тела;
- $\psi = \beta - 1 = P/\phi = P/\phi$ — коэффициент пористости (относительный объем пор);
- ψ_1 — некоторое значение ψ ;
- x — радиус контакта частицы (размерность L);
- χ — степень несовершенства консолидированного тела;
- $1 - \chi$ — степень совершенства консолидированного тела;
- $y = 1 - z$ — безразмерный коэффициент автономности;
- $y_c = 1 - z_c$ — среднее значение y ;
- $y_{ц} = 1 - z_{ц}$ — среднее циклическое значение y в интервале от ϕ до $\phi = 1$;
- $z = d\omega/d\phi$ — безразмерный коэффициент консолидации;
- $z_c = \Delta\omega/\Delta\phi$ — среднее (кумулятивное) значение z в интервале $\Delta\phi$;
- $\alpha = \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{1 - \phi_0}$ — циклическое (кумулятивное) значение z в интервале от $\phi = \phi_0$ до $\phi = 1$;
- ω — пластически деформированная доля объема частиц;
- $\omega_{\max} = \omega_n$ — пластически деформированная доля объема при $\phi = 1$.

Металлические порошковые и волокнистые материалы — представители семейства консолидированных веществ, широко распространенных в природе и технике

ГЛАВА I ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОВЕДЕНИЯ И СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ И ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. КОНСОЛИДАЦИЯ И КОНСОЛИДИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИХ РОЛЬ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

«Консолидация» — новый термин, который еще не получил у нас окончательно «прав гражданства». За рубежом этот термин за последнее десятилетие все шире распространяется, особенно для обозначения таких процессов, как прессование и формирование всевозможных порошков и порошковых материалов. Несомненны тенденции и к расширению применения термина «консолидация» и к его пониманию в широком, а не в узком смысле.

Трудно перевести с буквальной точностью латинское слово «консолидация», так как оно включает в себя ряд оттенков. В этом слове частица «кон» обозначает со, совместно, взаимно, частица «солидация» — отверждение, упрочнение, объединение, соединение, увеличение связности, преобразование в цельное твердое тело. Довольно близки к буквальному такие переводы слова «консолидация» как соотверждение, соукрепление, скрепление, объединение, соединение воедино и т. п.

Зато, в отличие от буквального перевода, смысл термина «консолидация» в современной науке и технике точен и однозначен. Консолидация — процесс или совокупность процессов получения цельных и связных твердых тел и изделий путем объединения входящих в их состав структурных элементов. К этому определению необходимо сделать некоторые дополнительные замечания.

Естественно, что такое объединение в единое цельное тело почти всегда связано с изменением и иногда даже очень сильным изменением первоначальной структуры объединяемых элементов. Первоначальная структура элементов оказывает известное влияние как на процесс консолидации, так и на свойства консолидированного тела. Поэтому термин «консолидация» применяется только по отношению к таким процессам, при которых главная объемная часть структурных элементов остается в твердом состоянии. Таким образом, материалы, полученные переплавкой брикетированных или небрикетированных порошков или стружки, нельзя назвать консолидированными. В то же время «композиции» из структурных элементов разного состава, меньшая объемная часть которых расплавляется или же вводится в жидком виде в процессе получения этих композиций, можно с полным правом отнести к консолидированным материалам.

Необходимость применения термина «консолидация» диктуется тем, что никакой другой термин не может характеризовать общую сущность многообразных процессов объединения отдельных элементов в цельные тела — например, таких частных процессов, как прессование порошков и волокон, спекание, получение тканей, войлока из неметаллических и металлических волокон и т. п. Например, термин «формование» явно менее пригоден для обозначения этой группы процессов, так как их основной физический смысл не столько в придании формы объединенному телу, сколько в придании ему способности сохранять форму.

Точно так же только термин «консолидированные материалы и тела» пригоден для характеристики исключительно разнообразной продукции, полученной консолидацией, — строительных материалов, керамики, бумаги, неметаллических и металлических тканей и трикотажа, спеченных порошковых и волокнистых материалов и др.

Структурные элементы, из которых получают консолидированные тела, в тех случаях, когда речь идет об их индивидуальном поведении, называют частицами. Частица — индивидуальное тело с небольшими размерами, по крайней мере в двух измерениях — порядка от 0,1 $\mu\text{м}$ до 1 мм , в большинстве случаев 10—100 $\mu\text{м}$. Частицы порошков имеют размеры такого же порядка и по третьему измерению — длине. Волокнистые частицы по длине