

УДК 671.762.045

Тепловые процессы при холодном деформировании пористых материалов в жестких матрицах

© 2004 А.В.Алифанов, В.М.Голуб, Н.В.Бурносов*

ГНУ "Физико-технический институт НАНБ", Минск
E-mail: phti@tut.by

* Белорусский государственный технологический университет, Минск
Поступила в редакцию 18 июня 2004 г.

Разработаны инженерные методы расчета основных тепловых характеристик процесса формирования пористых порошковых композиций в условиях холодного деформирования в жестких матрицах.

Engineer calculation method of the main heat characteristics for the formation processes of the porous powder compositions during cold deformation conditions in the sharp matrix has been developed.

Введение

Процесс холодного прессования в жестких матрицах в настоящее время используется для получения различного рода изделий и заготовок из порошковых композиций. Формирование порошковых прессовок происходит при непрерывном изменении их размеров, а также уменьшении пористости и увеличении плотности материала. При этом происходит выделение теплоты деформации, которая в большинстве случаев практически равномерно распределяется по всему объему прессовки, что приводит к ее значительному разогреву. Однако, так как процесс прессования обычно протекает в условиях теплообмена прессовки с контактирующими поверхностями пресс-формы, а в некоторых случаях — с предварительным подогревом порошкового материала и матрицы, то определенный интерес представляет характер изменения температурного поля порошковой прессовки в течение всего процесса ее деформирования в жестких матрицах.

Метод прессования в жестких матрицах позволяет получать прессовки разнообразной конфигурации. В то же время задача о распространении тепла в теле произвольной формы является наиболее сложной во

всей теории теплопроводности и в общем случае строгими аналитическими методами решена быть не может. При решении задач теплообмена влияние конфигурации может быть эффективно учтено путем использования эквивалентного размера, определяемого из условия равенства объемов рассматриваемого и эквивалентного тел на основе принципа стабильности теплового потока [1]. При этом практически все характерные типы существующих тел можно приближенно свести к трем классическим видам, таким как неограниченная плоская стенка, бесконечно длинный цилиндр и шар, что позволяет решать задачу о распространении тепла в прессовках произвольной формы.

Целью данной работы является разработка инженерных методов расчета основных тепловых характеристик процесса прессования порошковых материалов в жестких матрицах.

Прессование в условиях теплоизоляции

Наиболее характерной формой тела, получаемой прессованием металлических порошков в жестких матрицах, например, методом осадки в закрытом штампе, является цилиндрическая. Будем считать, что

в процессе прессования теплофизические характеристики порошковой системы и температура пресс-формы не меняются.

При деформировании порошковой прессовки, теплоизолированной от пресс-формы, изменение температуры материала происходит только за счет выделения теплоты деформации [2]. При этом объем прессовки непрерывно уменьшается, а ее плотность увеличивается.

Дифференциальное уравнение теплового баланса процесса должно учитывать элементарное количество выделившейся теплоты прессования и теплоты, аккумулированной прессовкой. Используя известную зависимость работы прессования порошкового материала от его свойств, давления деформирования и размеров прессовки при наличии внешнего трения о стенки пресс-формы [3], дифференциальное уравнение теплового баланса процесса можно записать в виде:

$$mcdT = -P_k S I h_k \left(1 + \frac{A}{2v}\right) \frac{(v^n - v_0^n) dv}{(1 - v_0^n) v^2}, \quad (1)$$

где m — масса прессовки; c — удельная теплоемкость прессовки; T — текущая температура прессовки; P_k — давление истечения максимально уплотненного (компактного) порошкового материала; S — номинальное сечение прессовки; I — тепловой эквивалент работы; A — постоянная, характеризующая размеры прессовки [2]; $v = h_x/h$ — текущая относительная плотность прессовки; $v_0 = h_x/h_0$ — начальная относительная плотность прессовки; h_k , h и h_0 — конечная, текущая и начальная высота прессовки; n — показатель степени, зависящий от механических свойств, режима обработки, коэффициента контактного трения и относительной плотности порошкового материала.

Проинтегрировав (1) в пределах от T_0 до T и от v_0 до v , получаем зависимость температуры прессовки от параметров процесса:

$$T = T_0 + \frac{P_k S I h_k}{(1 - v_0^n) mc} \times \left[\frac{1}{n-1} (v^{n-1} - v_0^{n-1}) + \left(\frac{v_0^n}{v} - v_0^{n-1} \right) + \frac{A}{2(n-2)} (v^{n-2} - v_0^{n-2}) + \frac{A}{4} \left(\frac{v_0^n}{v^2} - v_0^{n-2} \right) \right], \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура прессовки.

Давление прессования для реального процесса определяется выражением [3]:

$$P_0 = P_k \left(1 + \frac{A}{2v}\right) \frac{v^n - v_0^n}{1 - v_0^n}. \quad (3)$$

На рис.1 приведены зависимости давления прессования и температуры от относительной плотности прессовки для порошков алюминия ($P_k=5465$ кг/м², $n=5,29$), железа ($P_k=10200$ кг/м², $n=5,34$), меди ($P_k=11930$ кг/м², $n=5,23$) и титана ($P_k=21460$ кг/м², $n=4,94$). Значение постоянной A , характеризующей размеры прессовки и ее взаимодействие с пресс-формой [3], для всех материалов было принято одинаковым ($A=0,16h_k/x_1$). Величины P_k и n определялись исходя из механических свойств металлов [4] по методике [3]. Исходя из данных [5] о том, что плотность большинства порошковых материалов составляет от 0,25 до 0,40, начальная плотность v_0 для всех материалов принималась равной 0,35. Как видно из рис. 1, заметный разогрев прессовки начинается после достижения величины относительной плотности $v=0,7$, причем наиболее сильное повышение температуры наблюдается при прессовании порошка титана, что объясняется высокой прочностью и, соответственно, сильным сопротивлением титана сжатию. Необходимо

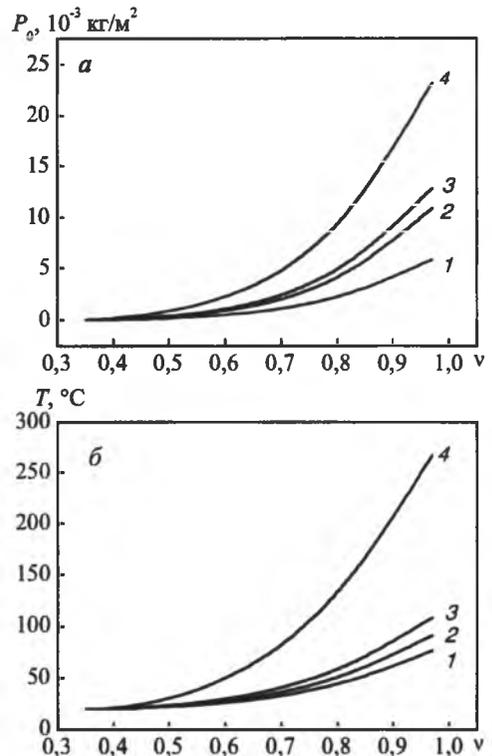


Рис.1. Зависимость давления прессования порошковой насыпки P_0 (а) и температуры прессовки T (б) от относительной плотности материала: 1 — алюминий; 2 — железо; 3 — медь; 4 — титан.

отметить, что ф-ла (2) позволяет учесть начальное состояние сжимаемого материала и фазу процесса, в отличие от уравнения (1.20) в работе [2], согласно которой повышение температуры прессовки зависит только от величины конечной деформации независимо от значений всех других факторов. Таким образом, в условиях теплоизоляции прессовки от окружающей среды при повышении давления прессования и относительной плотности порошкового материала температура системы непрерывно увеличивается, причем наиболее интенсивно — на конечной стадии процесса сжатия.

Температурный режим прессования в условиях теплообмена с окружающей средой

Реальный процесс прессования порошкового материала в жестких матрицах обычно протекает в условиях нагрева прессовки за счет выделения теплоты деформации и одновременного ее охлаждения за счет теплообмена через наружную поверхность с окружающей средой, в качестве которой выступают элементы пресс-формы. Используемое при анализе предположение о равномерном распределении температуры по сечению прессовки соответствует случаю малой интенсивности теплообмена через охлаждаемую поверхность.

Дифференциальное уравнение теплового баланса процесса должно учитывать элементарное количество теплоты прессования, аккумулированной теплоты и теплоты, отведенной от поверхности прессовки в окружающую среду.

Элементарное количество теплоты, отведенной с поверхности за время dt , равно [1]:

$$dQ_{\alpha} = \alpha(T - T_0) F dt, \tag{4}$$

где $F = 2\pi x_1 h$ — площадь боковой поверхности охлаждения цилиндрической прессовки со стороны стенок пресс-формы; x_1 — радиус прессовки; α — коэффициент теплоотдачи.

Зависимость параметров процесса от времени прессования порошкового материала можно определить из следующих соображений. Так как скорость прессования W_{π} обычно является постоянной величиной в течение всего процесса деформирования, то можно записать

$$t = \frac{h_0 - h}{W} = \frac{h}{W} \left(\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v} \right). \tag{5}$$

После дифференцирования

$$dt = -\frac{1}{W} dh = \frac{h}{W} \frac{dv}{v^2}. \tag{6}$$

Уравнение теплового баланса с учетом (1), (4), (6) имеет вид:

$$mcdT + \alpha \frac{2\pi x_1 h h_k}{W_{\pi}} (T - T_0) \frac{dv}{v^2} = -P_{\kappa} S l h_k \left(1 + \frac{A}{2v} \right) \frac{(v^n - v_0^n)}{(1 - v_0^n)} \frac{dv}{v^2}. \tag{7}$$

После некоторых преобразований и интегрирования ур-я (7) [6,7], зависимость температуры прессовки от параметров процесса прессования и характера теплообмена на ее наружной поверхности принимает вид:

$$T = T_0 + \exp \left(-\frac{\alpha \pi x_1}{W_{\pi} mc} (h_0^2 - h^2) \right) \left[B_1 (h_0^4 - h^4) + B_2 (h_0^3 - h^3) - B_3 (h_0^2 - h^2) - B_4 (h_0 - h) - \frac{B_5}{n-1} \left(\frac{1}{h_0^{n-1}} - \frac{1}{h^{n-1}} \right) - \frac{B_6}{n-2} \left(\frac{1}{h_0^{n-2}} - \frac{1}{h^{n-2}} \right) + \frac{B_7}{n-3} \left(\frac{1}{h_0^{n-3}} - \frac{1}{h^{n-3}} \right) + \frac{B_8}{n-4} \left(\frac{1}{h_0^{n-4}} - \frac{1}{h^{n-4}} \right) \right], \tag{8}$$

где $B_1 = NAE/8h_{\kappa}$, $B_2 = NE/3$, $B_3 = NA/4mch_{\kappa}$, $B_4 = N/mc$, $B_5 = Lh_{\kappa}^n/mc$, $B_6 = LAh_{\kappa}^{n-1}/2mc$, $B_7 = Lh_{\kappa}^n E$, $B_8 = LAh_{\kappa}^{n-1} E/2$, $N = P_{\kappa} S l v_0^n / (1 - v_0^n)$, $L = P_{\kappa} S l / (1 - v_0^n)$, $E = \alpha \pi x_1 / W_{\pi} (mc)^2$.

Полученная формула позволяет рассчитать температуру порошковой прессовки в любой момент процесса деформирования. При этом учитывается как тепловой эффект деформации, так и наличие внешнего охлаждения системы, что соответствует реальному технологическому процессу прессования пористого порошкового материала в условиях малой интенсивности теплообмена с окружающей средой (пресс-формой).

Характер изменения температуры прессовки при прочих равных условиях определяется, в основном, скоростью прессования W_{π} и интенсивностью внешнего охлаждения, то есть величиной коэффициента теплообмена α . При малых значениях W_{π} и больших α разогрев прессовки, как правило, отсутствует и, наоборот, при малой интенсивности теплообмена и высоких скоростях прессования происходит значительное увеличение температуры деформируемого материала.

Если интенсивность тепловыделения при деформировании равна интенсивности теплоотвода с наружной поверхности прессовки, то температура прессовки останется постоянной в течение всего

процесса деформирования. Величина скорости прессования $W_{пр}$, при которой достигается такое равновесие, определяется из соотношения (8) при условии $T=T_0$. В этом случае

$$W_{пр} = \frac{\alpha L x_0}{(mc)^2} \left[\frac{NA}{8h_k} (h_0^4 - h^4) + \frac{N}{3} (h_0^3 - h^3) + \frac{Lh_k^n}{n-3} \left(\frac{1}{h_0^{n-3}} - \frac{1}{h^{n-3}} \right) + \frac{LAh_k^{n-1}}{2(n-4)} \left(\frac{1}{h_0^{n-4}} - \frac{1}{h^{n-4}} \right) \right] \times \left[B_3 (h_0^2 - h^2) + B_4 (h_0 - h) + \frac{B_5}{n-1} \left(\frac{1}{h_0^{n-1}} - \frac{1}{h^{n-1}} \right) + \frac{B_6}{n-2} \left(\frac{1}{h_0^{n-2}} - \frac{1}{h^{n-2}} \right) \right] \quad (9)$$

Расчеты по ф-ле (9) показывают, что даже в условиях интенсивного теплообмена при вынужденной конвекции ($\alpha=50-100$ Вт/(м²·град)) величина $W_{пр}$ не будет превышать 0,1 мм/с. В большинстве реальных процессов (прессование на гидравлическом прессе и др.) скорости прессования достигают десятков и сотен миллиметров в секунду, так что все эти процессы практически всегда сопровождаются разогревом материала прессовки.

Распределение температурного поля по сечению прессовки

При деформировании порошкового материала в условиях интенсивного внешнего теплообмена со стороны контактирующих поверхностей пресс-формы (окружающей среды) по сечению прессовки возникает значительный перепад температуры. На практике часто требуется знать толщину охлажденного слоя или закон продвижения фронта определенной температуры (фронта охлаждения) в теле заготовки. При прессовании в условиях теплообмена протекают два конкурирующих процесса — разогрев всего объема прессовки до температуры T за счет выделения теплоты деформации и теплоотдача через боковые стенки пресс-формы. В результате на некотором расстоянии x_0 от боковой поверхности температура прессуемого порошка T_T будет меньше величины T . При этом фронт охлаждения распространяется от поверхности вглубь прессовки, достигает ее центральной части, а затем происходит одновременное охлаждение всего объема материала. Для определения характера изменения температурного поля порошковой прессовки можно воспользоваться методом исключения переменных [1].

Распределение температуры по сечению прессовки можно задать в виде параболы порядка n_1 , которая на начальной стадии процесса имеет вид

$$T_T = T - (T - T_0) \left(1 - \frac{x}{x_0} \right)^{n_1}, \quad (10)$$

где координата x отсчитывается от боковой поверхности цилиндра по направлению к его центру; x_0 — положение фронта охлаждения.

Дифференциальное уравнение теплового баланса процесса должно учитывать элементарное количество потерянной аккумулированной теплоты прессования dQ и количество тепла, переданное в окружающую среду через поверхность dQ_α .

При параболическом распределении температуры по сечению цилиндрической порошковой прессовки количество отведенной аккумулированной теплоты dQ за время dt может быть выражено через параметры процесса прессования [3]:

$$dQ_\alpha^{\text{акк}} = \frac{P_s S l h_k}{(n_1 + 1)(1 - v_0^n)} \left(\frac{A}{v} + 2 \right) (v^n - v_0^n) \times \left[1 - \frac{x_0}{(n_1 + 2)x_1} \right] \frac{x_0}{x_1} \frac{dv}{v^2}, \quad (11)$$

или теплофизические характеристики материала [1]

$$dQ_\alpha^{\text{акк}} = \frac{F \rho c (T_n - T_0)}{n_1 + 1} \frac{1 + 2n_1 \frac{\lambda}{\alpha x_0}}{\left(1 + n_1 \frac{\lambda}{\alpha x_0} \right)^2} dx. \quad (12)$$

Количество тепла dQ_α , переданное через боковую поверхность за тот же промежуток dt , составляет

$$dQ_\alpha = n_1 \frac{\lambda}{x_0} (T - T_n) F dt, \quad (13)$$

где λ — коэффициент теплопроводности порошкового материала прессовки.

Значение коэффициента λ зависит от состава и состояния материала, а также от его пористости. В работе [5] на основе теоретических и экспериментальных исследований было получено выражение для расчета коэффициента теплопроводности пористого тела в условиях хаотического распределения неизолированных включений:

$$\lambda = \lambda_n (1 - 1,5\Pi), \quad (14)$$

где λ_n — коэффициент теплопроводности материала частиц порошка, $\Pi = (1 - v)$ — относительная пористость тела.

Система дифференциальных уравнений теплового баланса с учетом (11)-(14) принимает вид

$$\frac{P_{\kappa} S I h_{\kappa}}{(n_1 + 1)(1 - v_0^n)} \left(\frac{A}{v} + 2 \right) (v^n - v_0^n) \times$$

$$\times \left[1 - \frac{x_0}{(n_1 + 2)x_1} \right] \frac{x_0}{x_1} \frac{dv}{v^2} = n_1 \frac{\lambda}{x_0} (T - T_{\text{II}}) F dt, \quad (15)$$

$$n_1 \frac{\lambda}{x_0} (T - T_{\text{II}}) F dt = \frac{F \rho c (T_{\text{II}} - T_0)}{n_1 + 1} \times$$

$$\times \frac{1 + 2n_1 \frac{\lambda}{\alpha x_0}}{\left(1 + n_1 \frac{\lambda}{\alpha x_0} \right)^2} dx. \quad (16)$$

В результате дальнейших преобразований ур-ия (16) получаем трансцендентное уравнение для определения глубины x_0 проникновения фронта охлаждения в тело прессовки:

$$x_0^2 + \frac{2n_1 \lambda_n (k_1 v - k_2)}{\alpha} x_0 - 2n_1 \lambda_n (k_1 v - k_2) \times$$

$$\times \left\{ \frac{n_1 \lambda_n (k_1 v - k_2)}{\alpha^2} \ln \left[1 + \frac{\alpha x_n}{n \lambda_n (k_1 v - k_2)} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{(n_1 + 1)(h_0 - h)}{c \rho v W_n} \right\} = 0, \quad (17)$$

где $k_1 = 1,5$ и $k_2 = 0,5$.

Зависимость температуры поверхности порошковой прессовки от параметров процесса получается подстановкой в (15) величин dt и x_0 из (5) и (17) и площади боковой поверхности $F = 2\pi x_1 h_1 / v$:

$$T = T - \frac{P S I}{2\pi(n_1 + 1)} (A + 2v) \frac{(v^n - v_0^n)}{(1 - v_0^n)} \times$$

$$\times \left[1 - \frac{x_0}{(n_1 + 2)x_1} \right] \frac{x_0^2}{x_1^2} \frac{W_n}{\lambda_n (k_1 v - k_2) h_{\kappa}}. \quad (18)$$

Температура T рассчитывается по формуле (8). При известных значениях T , T_{II} и x_0 с помощью выражения (10) находится распределение температуры по сечению прессовки в течение всего процесса деформирования.

Выражение (18) позволяет рассчитать изменение температуры порошковой цилиндрической прессовки до момента достижения фронтом охлаждения ее центральной части, то есть в течение времени $t = t_{\text{II}}$, которому соответствует условие $x_0 = x_1$. Величину t_{II}

можно определить из уравнения теплового баланса процесса, учитывающего количество отведенной аккумулярованной теплоты к моменту t_{II} и количество тепла, подведенное к поверхности теплопроводностью за тот же промежуток времени [1]:

$$\frac{\rho c v_{\text{II}}}{n_1 + 2} F_{\text{II}} x_1 (T_{\text{II}} - T_{\text{II}}) =$$

$$= n_1 \frac{\lambda_n}{2x_1} (k_1 v - k_2) (T_{\text{II}} - T_{\text{II}}) F_{\text{II}} t_{\text{II}}, \quad (19)$$

где индексом "II" обозначены соответствующие величины в момент $t = t_{\text{II}}$. При этом необходимо отметить, что $v_{\text{II}} = h_{\kappa} / h_{\text{II}}$ и $h_{\text{II}} = h_0 - W_{\text{II}} t_{\text{II}}$.

Решение ур-ия (19) относительно t_{II} имеет вид:

$$t_{\text{II}} = \frac{(k_1 h_{\kappa} - k_2 h_0)}{k_2 W_n} \times$$

$$\times \left[\sqrt{\frac{2\rho c x_1^2 h_{\kappa} W_n}{n_1 \lambda_n (n_1 + 2) (k_1 h_{\kappa} - k_2 h_0)^2} + \frac{1}{4}} - \frac{1}{2} \right]. \quad (20)$$

Начиная с момента $t = t_{\text{II}}$, процесс деформирования пористого материала протекает в условиях нагревания прессовки за счет выделения теплоты деформации и одновременного охлаждения всего ее объема. Анализ показывает, что в реальных технологических процессах продолжительность деформирования материала обычно значительно меньше величины t_{II} . На рис.2. показано движение фронта охлаждения вглубь прессовки радиусом 2 см в процессе прессования различных металлических порошков. Как видно, для материалов с высокой теплопроводностью (Cu, Al) его положение при завершении процесса сжатия близко к центру насыпки (теоретическое значение для меди даже превышает величину радиуса). В случае титана и железа, имеющих меньшее значение λ , фронт

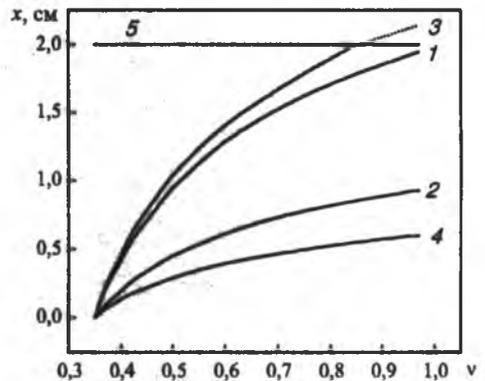


Рис.2. Зависимость глубины проникновения фронта охлаждения вглубь прессовки от относительной плотности порошка: 1 — алюминий; 2 — железо; 3 — медь; 4 — титан; 5 — радиус прессовки.

охлаждения за время прессования успевает пройти расстояние меньше половины радиуса прессовки. Кроме того, следует учитывать, что с повышением скорости прессования это расстояние будет уменьшаться, поэтому полученные зависимости, характеризующие тепловые условия формирования прессовок за время $t \leq t_{ц}$, могут использоваться для практических расчетов всего технологического процесса прессования.

Возвращаясь к работе [2] можно заметить, что из полученной в ней формулы (1.20) следует независимость величины нагрева прессовки от ее массы. Такой результат получается из-за того, что процесс прессования в данной работе рассматривался без учета внешнего трения, то есть взаимодействия материала прессовки со стенками пресс-формы. Расчеты по формулам (2) и (8), учитывающим данный фактор, показывают, что с увеличением массы прессуемого порошка происходит линейный рост конечной температуры прессовки (рис.3), более заметный для менее плотного материала (Al). Данный факт можно объяснить обратной пропорциональностью высоты насыпки и плотности порошкового материала, то есть при одинаковом радиусе цилиндрической пресс-формы и одинаковой массе порошка высота насыпки более легкого материала будет выше, что, в свою очередь, приводит к увеличению хода пуансона и, следовательно, к увеличению тепловыделения за счет внешнего трения.

Проведенный анализ теплового режима осуществлялся при условии $T_0 = \text{const}$, что обычно соответствует процессу холодного деформирования пористого материала при постоянной температуре пресс-формы. В некоторых случаях при интенсивной длительной работе температура пресс-формы может несколько повышаться, что может быть учтено с помощью использования средней калориметрической температуры [8] и поэтапного расчета температурного поля прессовки.

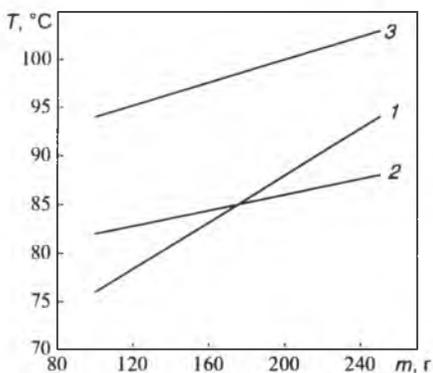


Рис.3. Зависимость конечной температуры прессовки от ее массы m : 1 — алюминий; 2 — железо; 3 — медь.

При проведении практических расчетов необходимо иметь в виду, что коэффициент теплоотдачи и теплофизические свойства материала порошковой прессовки зависят от температуры, что не учитывалось в данной работе. Эту трудность обычно обходят путем применения метода последовательных приближений или итераций [3], при котором в первом приближении используются значения теплофизических параметров для некоторой предварительно выбранной температуры. Рассчитанные значения температур используются для уточнения коэффициентов, которые затем используются для расчетов во втором приближении, и т.д. При необходимости описанный механизм повторяется несколько раз, что позволяет получать данные высокой степени точности.

Выводы

Получены аналитические выражения, описывающие закономерности изменения температурного поля пористого порошкового материала в течение всего процесса прессования с учетом теплового эффекта деформации, внешнего трения и охлаждения прессовки при непрерывном изменении ее пористости. Предложенная схема расчетов позволяет рассчитывать тепловые эффекты в реальных процессах прессования порошка и, тем самым, моделировать новые технологические процессы прессования порошков и определять наиболее оптимальные параметры этих процессов (давление, скорость, условия теплообмена).

Аналогичным образом могут быть определены закономерности теплового режима формирования плоских и шарообразных прессовок.

Литература

1. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. Л.: Госэнергоиздат, 1959, 184 с.
2. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. М.: Машиностроение, 1979, 568 с.
3. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. М.: Металлургия, 1969, 262 с.
4. Тихонов Л.В., Кононенко В.А., Прокопенко Г.И., Рафаловский В.А. Механические свойства металлов и сплавов. Киев: Наукова думка, 1986, 566 с.
5. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. М.: Металлургия, 1991, 204 с.
6. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1973, 228 с.
7. Смолянский М.Л. Таблицы неопределенных интегралов. М.: Наука, 1967, 216 с.
8. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. М.: Машгиз, 1960, 436 с.