

УДК 621.73.043:621.762.4

**А. В. Алифанов<sup>1</sup>, В. М. Голуб<sup>2</sup>, А. М. Милюкова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск

<sup>2</sup> Учреждение образования «Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка», Минск

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ХОЛОДНОМ ПРЕССОВАНИИ ДИСКРЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рассмотрены особенности холодного прессования дискретных материалов в жёстких матрицах как в условиях теплоизоляции, так и при наличии теплообмена с окружающей средой, а также распределения температурного поля по сечению прессуемой детали. Выведены соответствующие зависимости.

**Ключевые слова:** тепловыделение, пластическое деформирование, дискретные композиции, порошковое прессуемое изделие, холодное прессование.

**Введение.** Известно, что на характер пластического течения определённое влияние оказывают факторы упрочнения и разупрочнения в процессах деформирования упрочняющихся материалов. И если упрочнение происходит за счёт накопленных деформаций, то разупрочнение может произойти из-за выделения соответствующего количества тепла в процессе деформации или передачи его от внешних источников.

В данной статье предметом исследования являются процессы тепловыделения и теплопередачи, происходящие непосредственно при холодном деформировании дискретных материалов. Рассматриваются тепловые процессы при деформировании дискретных материалов до их максимального уплотнения. Необходимо отметить, что тепловые процессы, сопутствующие реальным процессам пластического деформирования, могут инициировать разрывы смазочных прослоек, развитие наростов на инструменте и появление задиров на поверхности изделий, что недопустимо.

Целью исследования является разработка инженерных методов расчёта основных тепловых характеристик процесса прессования дискретных (порошковых, гранулированных) материалов в жёстких матрицах.

**Особенности холодного деформирования дискретных материалов.** Процесс деформирования дискретных материалов заключается в их уплотнении и пластической обработке в целях обеспечения определённых свойств, размеров и формы прессуемых изделий. В ходе деформирования происходит непрерывное уменьшение пористости дискретного материала с одновременным увеличением его относительной плотности. При этом дискретные частицы (порошок, гранулы), перемещаясь относительно друг друга, вначале заполняют промежуточные пустоты (поры), а далее, после достижения наиболее плотной упаковки, уплотнение осуществляется за счёт деформирования самих частиц. Деформация частиц, как упругая, так и пластическая, начинается вблизи контактных участков с постепенным распространением вглубь основы частицы [1], [2]. В результате частицы деформируемого материала схватываются друг с другом по контактирующим поверхностям, что обеспечивает сохранение заданной формы прессуемой детали после её извлечения из матрицы. Наличие упругой деформации при прессовании дискретного материала влечёт за собой возникновение упругих напряжений, которые после освобождения прессуемой детали приводят к её частичному расширению, что называют упругим последствием. Процессы объёмного деформирования частиц дискретного материала и (в меньшей степени) упругого деформирования приводят к довольно значительному повышению температуры прессуемого изделия, которая бывает тем выше, чем больше величина сопротивления деформированию обрабатываемого материала.

При прессовании дискретного материала возникают силы трения как между отдельными частицами (внутреннее трение), так и между дискретными частицами и стенками инструмента (внешнее трение) [3]. Величина силы внешнего трения, как правило, возрастает с увеличением усилия прессования. Наличие

внешнего трения приводит к неравномерному распределению напряжений по сечению прессуемой детали, а также к неравномерной её плотности.

Силы внешнего и внутреннего трения также вызывают повышение температуры прессуемой заготовки, причём с неравномерным её распределением по сечению изделия.

Таким образом, деформационные процессы и силы трения (внутренние и внешние) влекут за собой изменение теплосодержания деформируемой системы, что оказывает значительное влияние на все процессы, происходящие при прессовании дискретного материала (сопротивление деформации, диффузионные и фазовые явления и т. д.). В конечном счёте характер изменения температуры прессуемой детали в процессе деформирования существенно влияет на её качество, структуру и свойства.

В то же время подавляющее большинство исследований в области деформирования дискретных материалов посвящено, главным образом, выяснению закономерностей, связывающих усилия прессования и плотность дискретной композиции. Необходимые зависимости в основном устанавливаются на основе анализа контактного взаимодействия дискретных частиц с использованием принципов статической механики [1], [2], [3], [4]. При этом температура дискретной системы почти всегда принимается постоянной, только в отдельных случаях влияние температуры учитывается значениями физико-механических свойств. Исключением является, например, исследование А. В. Степаненко и Л. А. Исаевича [5], где приведён приближённый расчёт охлаждения металлических лент, полученных из порошка и гранул методом прокатки. Тепловой режим формирования дискретных композиций в условиях различных методов деформирования практически не изучен. В то же время эффективное применение в промышленности пористых многофункциональных материалов постоянно повышает требования к качеству продукции, что обуславливает необходимость создания инженерных методов расчёта основных режимных параметров технологического процесса, учитывающих характерные особенности тепловых условий деформирования прессуемых изделий из дискретных материалов. Это позволит не только осуществлять отработку оптимальной технологии производства, но и в значительной мере управлять свойствами и качеством готовых изделий. Кроме того, установление закономерностей характера изменения условий теплообмена в процессе формирования пористых прессуемых деталей даёт реальную возможность создания новых дискретных (порошковых, гранулированных) композиционных материалов с заданными функциональными свойствами.

**Особенности прессования в жёстких матрицах.** Процесс холодного прессования в жёстких матрицах в настоящее время используется для получения различного рода изделий и заготовок из соответствующих порошков (гранул) и их композиций. Формирование порошковых (гранулированных) прессуемых изделий происходит при непрерывном изменении их размеров, а также уменьшении пористости и увеличении плотности материала. При этом имеет место выделение теплоты деформации, которая в большинстве случаев распределяется по всему объёму изделия, что приводит к его нагреванию до значительных температур. В то же время процесс прессования обычно протекает в условиях теплообмена прессуемой детали с контактирующими поверхностями пресс-формы. Кроме того, в некоторых случаях осуществляется предварительный подогрев порошкового материала и матрицы. В силу всего вышесказанного определённый интерес представляет характер изменения температурного поля порошковой прессуемой заготовки в течение всего процесса её деформирования в жёстких матрицах.

Метод прессования в жёстких матрицах позволяет получать изделия самой разнообразной конфигурации. В то же время задача о распределении тепла в телах произвольной формы является наиболее сложной из всей теории теплопроводности и в общем случае строгими аналитическими методами решена быть не может. При решении задач теплообмена влияние конфигурации может быть эффективно учтено при использовании эквивалентного размера, определяемого из условия равенства объёмов рассматриваемого и эквивалентного тел, на основе принципа стабильности теплового потока [6]. При этом практически все характерные типы существующих тел можно приближённо свести к трём классическим видам (неограниченная плоская стенка, бесконечно длинный цилиндр и шар), что позволяет осуществлять решение задач распространения тепла в прессуемых изделиях произвольной формы.

**Прессование в условиях теплоизоляции.** Рассмотрим особенности изменения температурного поля цилиндрической прессуемой детали, которая наиболее характерна для случая прессования металлических порошков в жёстких матрицах, например, методом осадки в закрытом штампе (рисунок 1). Анализ процесса будем осуществлять при условии постоянства теплофизических коэффициентов системы и температуры пресс-формы.

При деформировании порошковой прессуемой детали в условиях её теплоизоляции от пресс-формы изменение температуры материала происходит только за счёт выделения теплоты деформации [7]. При этом имеет место непрерывное уменьшение объёма прессовки и увеличение её плотности.

Дифференциальное уравнение теплового баланса процесса должно объединять элементарное количество выделившейся теплоты прессования и теплоты, аккумулированной прессуемым изделием. Используя известную зависимость работы прессования порошкового материала от его свойств, давления деформирования и размеров прессуемого изделия при наличии внешнего трения о стенки пресс-формы [3], дифференциальное уравнение теплового баланса процесса можно представить в виде соотношения

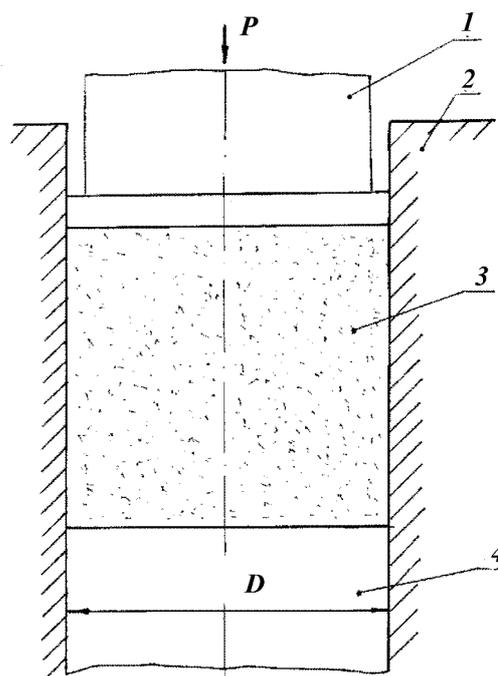
$$mcdT = -P_k S I h_k \left( 1 + \frac{A}{2v} \right) \frac{(v^n - v_0^n) dv}{(1 - v_0^n) v^2}, \quad (1)$$

- где  $m$  — масса прессуемого изделия;  
 $c$  — удельная теплоёмкость прессуемого изделия;  
 $T$  — текущая температура прессуемого изделия;  
 $P_k$  — давление истечения максимально уплотнённого (компактного) порошкового материала;  
 $S$  — номинальное сечение прессуемого изделия;  
 $I$  — тепловой эквивалент работы;  
 $A$  — постоянная, характеризующая размеры прессуемой детали [7];  
 $v = h_k / h$  — текущая относительная плотность прессуемого изделия;  
 $v_0 = h_k / h_0$  — начальная относительная плотность прессуемого изделия;  
 $h_k, h$  и  $h_0$  — конечная, текущая и начальная высота прессуемого изделия соответственно;  
 $n$  — показатель степени, зависящий от механических свойств, режима обработки, коэффициента контактного трения, относительной плотности порошкового материала.

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

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

где  $T_0$  — начальная температура прессуемого изделия.



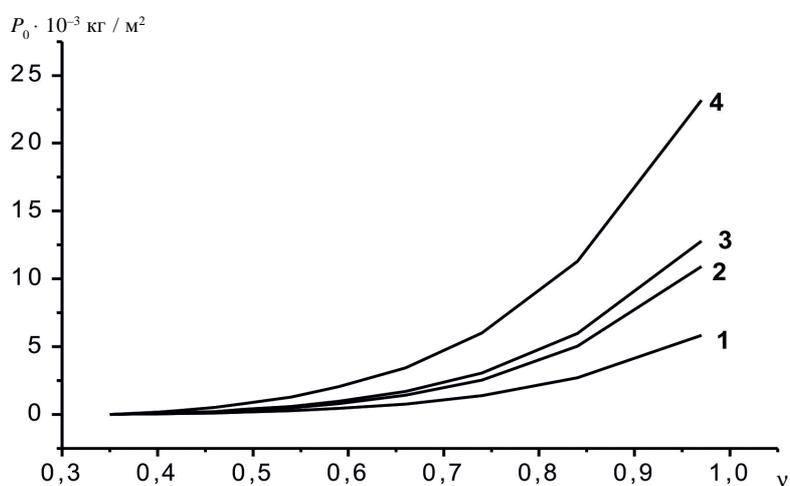
1 — верхний пуансон; 2 — матрица;  
 3 — пористая заготовка; 4 — нижний пуансон (выталкиватель)

Рисунок 1 — Схема прессования пористой заготовки в закрытом штампе

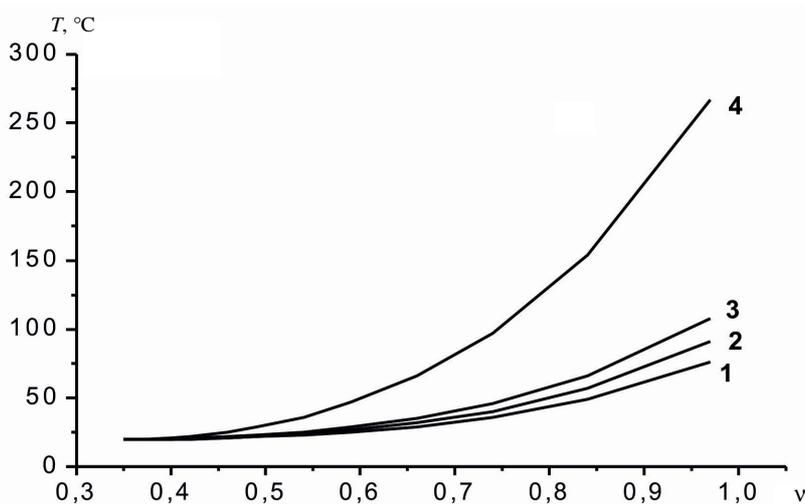
Давление прессования для реального процесса определяется выражением [3]

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

Приведены зависимости давления прессования (*a*) и температуры (*б*) от относительной плотности прессуемого изделия для различных порошков: алюминия ( $P_k$  равно 5 465 кг/м<sup>2</sup>,  $n = 5,29$ ), железа ( $P_k = 10\,200$  кг/м<sup>2</sup>,  $n = 5,34$ ), меди ( $P_k = 11\,930$  кг/м<sup>2</sup>,  $n = 5,23$ ) и титана ( $P_k = 21\,460$  кг/м<sup>2</sup>,  $n = 4,94$ ) (рисунок 2). Значение постоянной *A*, характеризующей размеры прессуемой детали и её взаимодействие с прессформой [3], для всех материалов было принято одинаковым ( $A = 0,16h_k/x_1$ ). Величины  $P_k$  и  $n$  определялись



*a)*



*б)*

1 — алюминий; 2 — железо; 3 — медь; 4 — титан

**Рисунок 2 — Зависимость усилия прессования  $P_0$  (*a*) и температуры прессуемого изделия (*б*) от относительной плотности металлических порошков**

исходя из механических свойств металлов [8] по методике, описанной в работе [3]. Начальная плотность  $v_0$  для всех материалов была выбрана равной 0,35.

Это соответствует данным исследования [9] о том, что большинство порошковых материалов имеет относительную плотность в диапазоне 0,25...0,40. На начальном этапе разогрев прессуемого изделия является незначительным (см. рисунок 2, б), а с достижением величины  $v \approx 0,7$  происходит резкое увеличение температуры. Заметен также значительно больший нагрев титана, что объясняется его высоким пределом прочности и, соответственно, сопротивлением сжатию. Необходимо отметить, что формула (2) позволяет учитывать начальное состояние сжимаемого материала и фазу процесса, в отличие от уравнения (1.20), приведённого в исследовании [7], в котором повышение температуры зависит только от величины конечной деформации без учёта вышеприведённых факторов.

Таким образом, в условиях теплоизоляции прессуемого изделия от окружающей среды при повышении давления прессования и относительной плотности порошкового материала температура системы непрерывно увеличивается, причём на конечной стадии сжатия достаточно интенсивно.

**Температурный режим процесса прессования при наличии теплообмена с окружающей средой.** Реальный процесс прессования порошкового материала в жёстких матрицах обычно протекает в условиях нагрева прессуемой детали за счёт выделения теплоты деформации и одновременного её охлаждения с наружной поверхности в окружающую среду, роль которой играют элементы пресс-формы. Анализ процесса проведём с использованием допущения о равномерном распределении температуры по сечению прессуемой заготовки, что соответствует малой интенсивности теплообмена на её поверхности охлаждения.

Дифференциальное уравнение теплового баланса процесса должно включать элементарные количества теплоты прессования, аккумулированной теплоты и теплоты, отведённой от поверхности прессуемой заготовки в окружающую среду.

Выражение для определения элементарного количества теплоты, отведённой с поверхности за время  $dt$ , имеет вид

$$dQ_\alpha = \alpha(T - T_0)Fdt, \tag{3}$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи [6];

$F$  — площадь боковой поверхности охлаждения цилиндрической прессуемой детали со стороны стенок пресс-формы, определяемая по формуле  $F = 2\pi x_1 h$ , где  $x_1$  — радиус прессуемой детали.

Зависимость между временем и параметрами процесса прессования порошкового материала будем определять из следующих соображений. Обычно скорость прессования  $V$  является величиной заданной и постоянной в течение всего процесса деформирования. При этом взаимосвязь между  $V$  и  $t$  может быть выражена в следующем виде:

$$t = \frac{h_0 - h}{V} = \frac{h_k}{V} \left( \frac{1}{v_0} - \frac{1}{v} \right) \tag{4}$$

Продифференцировав выражение (4), находим, что

$$dt = -\frac{1}{V} dh = \frac{h_k}{V} \frac{dv}{v^2}. \tag{5}$$

Уравнение теплового баланса с учётом соотношений (1), (3), (5), имеет вид

$$mcdT + \alpha \frac{2\pi x_1 h h_k}{V} (T - T_0) \frac{dv}{v^2} = -P_k S I h_k \left( 1 + \frac{A}{2v} \right) \frac{(v^n - v_0^n)}{(1 - v_0^n)} \frac{dv}{v^2}. \tag{6}$$

После некоторых преобразований и интегрирования уравнения (6) [10], [11] получаем зависимость температуры прессуемой детали от параметров процесса прессования и характера теплообмена на её наружной поверхности:

$$T = T_0 + \exp\left[-\frac{\alpha\pi x_1}{Vmc}(h_0^2 - h^2)\right] \left[ B_1(h_0^4 - h^4) + B_2(h_0^3 - h^3) - B_3(h_0^2 - h^2) - B_4(h_0 - h) - \frac{B_5}{n-1}\left(\frac{1}{h_0^{n-1}} - \frac{1}{h^{n-1}}\right) - \frac{B_6}{n-2}\left(\frac{1}{h_0^{n-2}} - \frac{1}{h^{n-2}}\right) + \frac{B_7}{n-3}\left(\frac{1}{h_0^{n-3}} - \frac{1}{h^{n-3}}\right) + \frac{B_8}{n-4}\left(\frac{1}{h_0^{n-4}} - \frac{1}{h^{n-4}}\right) \right], \quad (7)$$

$$\text{где } B_1 = \frac{NAE}{8h_k}; \quad B_2 = \frac{NE}{3}; \quad B_3 = \frac{NA}{4mch_k}; \quad B_4 = \frac{N}{mc}; \quad B_5 = \frac{Lh_k^n}{mc}; \quad B_6 = \frac{LAh_k^{n-1}}{2mc}; \quad B_7 = Lh_k^n E; \quad B_8 = \frac{LAh_k^{n-1}E}{2};$$

$$N = \frac{P_k S h_0^n}{1 - v_0^n}; \quad L = \frac{P_k S l}{1 - v_0^n}; \quad E = \frac{\alpha\pi x_1}{V(mc)^2}.$$

Полученная формула (7) позволяет осуществлять расчёт температуры порошковой прессуемой детали в течение всего 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 прессуемого изделия, при прочих равных условиях, в основном обуславливается скоростью прессования  $V$  и интенсивностью внешнего охлаждения, т. е. величиной коэффициента теплообмена  $\alpha$ . При малых значениях  $V$  и больших  $\alpha$  разогрев прессуемой детали, как правило, отсутствует, и наоборот, — при малой интенсивности теплообмена и высоких скоростях прессования происходит значительное увеличение температуры деформируемого материала. Рассмотрим случай скорости прессования  $V$ , при которой интенсивность тепловыделения за счёт работы деформации соответствует интенсивности теплоотвода с наружной поверхности прессуемой детали. При этом температура изделия остаётся постоянной в течение всего процесса деформирования. Величина  $V$  определяется из соотношения (7) при условии, что  $T$  равно  $T_0$ . Имеем

$$V = \frac{\alpha\pi x_1}{(mc)^2} \left[ \frac{NA}{8h_k}(h_0^4 - h^4) + \frac{N}{3}(h_0^3 - h^3) + \frac{Lh_k^n}{n-3}\left(\frac{1}{h_0^{n-3}} - \frac{1}{h^{n-3}}\right) + \frac{LAh_k^{n-1}}{2(n-4)}\left(\frac{1}{h_0^{n-4}} - \frac{1}{h^{n-4}}\right) \right] \times \left[ B_3(h_0^2 - h^2) + B_4(h_0 - h) + \frac{B_5}{n-1}\left(\frac{1}{h_0^{n-1}} - \frac{1}{h^{n-1}}\right) + \frac{B_6}{n-2}\left(\frac{1}{h_0^{n-2}} - \frac{1}{h^{n-2}}\right) \right]^{-1}. \quad (8)$$

Расчёты по формуле (8) показывают, что даже в условиях интенсивного теплообмена при вынужденной конвекции ( $\alpha$  равно 50...100 Вт/(м<sup>2</sup>·град)) величина  $V$  не превышает значений 0,1 мм/с. В большинстве же реальных процессов (прессование на гидравлическом прессе и др.) скорости прессования достигают десятков и сотен миллиметров в секунду. Таким образом, эти процессы практически всегда сопровождаются разогревом материала прессуемой детали.

**Распределение температурного поля по сечению прессуемого изделия.** При деформировании порошкового материала в условиях интенсивного внешнего теплообмена со стороны контактирующих поверхностей пресс-формы (окружающей среды) имеет место значительный перепад

температуры по сечению прессуемой детали. На практике часто требуется знать толщину охлаждённого слоя или закон продвижения фронта определённой температуры (фронта охлаждения) в теле заготовки. При прессовании в условиях теплообмена происходят два разнонаправленных процесса: разогрев всего объёма изделия до температуры  $T$  за счёт выделения теплоты деформации и теплоотдача через боковые стенки пресс-формы  $T_{п.-ф.}$ . Их взаимодействие приводит к тому, что на некотором расстоянии  $x_0$  от боковой поверхности температура прессуемого порошка  $T_{п.}$  будет меньше величины  $T$ . При этом в начале процесса фронт охлаждения распространяется от поверхности вглубь прессуемой детали, достигает её центральной части, и далее происходит одновременное охлаждение всего объёма материала. Для определения характера изменения температурного поля порошковой прессуемой заготовки используем метод исключения переменных [6] и зададимся распределением температуры по сечению прессуемой детали в виде параболы порядка  $n_1$ , которая для начальной стадии процесса имеет вид

$$T_{п.} = T - (T - T_{п.}) \left( 1 - \frac{x}{x_0} \right)^{n_1}, \tag{9}$$

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

Дифференциальное уравнение теплового баланса процесса должно объединять элементарное количество потерянной аккумулированной теплоты прессования  $dQ_{акк\ \alpha}$  и количество  $dt$  тепла, переданное в окружающую среду через поверхность  $dQ_{\alpha}$ .

При параболическом распределении температуры по сечению цилиндрической порошковой прессуемой детали количество отведённой аккумулированной теплоты  $dQ_{акк\ \alpha}$  за время  $dt$  может быть выражено следующим образом:

– через параметры процесса прессования [3] по формуле

$$dQ_{акк\ \alpha} = \frac{P_{к} S l h_{к}}{(n_1 + 1)(1 - v_0^n)} \left( \frac{A}{v} + 2 \right) (v^n - v_0^n) \left[ 1 - \frac{x_0}{(n_1 + 2)x_1} \frac{x_0}{x_1} \frac{dv}{v^2} \right]; \tag{10}$$

– через теплофизические характеристики материала [6] по формуле

$$dQ_{акк\ \alpha} = \frac{F \rho c (T_{п.} - T_0)}{n_1 + 1} \frac{1 + 2n_1 \frac{\lambda}{\alpha x_0}}{\left( 1 + n_1 \frac{\lambda}{\alpha x_0} \right)^2} dx. \tag{11}$$

Количество тепла  $dQ_{\alpha}$ , переданное через боковую поверхность за тот же промежуток  $dt$ , составляет

$$dQ_{\alpha} = n_1 \frac{\lambda}{x_0} (T - T_{п.}) F dt, \tag{12}$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности порошкового материала прессовки.

Значение коэффициента  $\lambda$  находится в непосредственной зависимости от состава и состояния материала, а также величины его пористости. В работе [9] на основе теоретических и экспериментальных исследований получено следующее выражение для расчёта коэффициента теплопроводности пористого тела в условиях хаотического распределения неизолированных включений:

$$\lambda = \lambda_n(1 - 1,5\Pi), \quad (13)$$

где  $\lambda_n$  — коэффициент теплопроводности материала частиц порошка;

$\Pi$  — относительная пористость тела, определяемая по формуле  $\Pi = (1 - v)$ .

Дифференциальные уравнения теплового баланса с учётом представленных соотношений (10)—(13) принимают вид

$$\frac{P_k S I h_k}{(n_1 + 1)(1 - v_0^n)} \left( \frac{A}{v} + 2 \right) (v^n - v_0^n) \left[ 1 - \frac{x_0}{(n_1 + 2)x_1} \right] \frac{x_0}{x_1} \frac{dv}{v^2} = n_1 \frac{\lambda}{x_0} (T - T_n) F dt, \quad (14)$$

$$n_1 \frac{\lambda}{x_0} (T - T_n) F dt = \frac{F \rho c (T_n - T_0)}{n_1 + 1} \frac{1 + 2n_1 \frac{\lambda}{\alpha x_0}}{\left( 1 + n_1 \frac{\lambda}{\alpha x_0} \right)^2} dx. \quad (15)$$

В результате дальнейших преобразований уравнения (15) получаем трансцендентное уравнение для определения глубины  $x_0$  проникновения фронта охлаждения в тело прессуемого изделия:

$$x_0^2 + \frac{2n_1 \lambda_n (k_1 v - k_2)}{\alpha} x_0 - 2n_1 \lambda_n (k_1 v - k_2) \times \left[ \frac{n_1 \lambda_n (k_1 v - k_2)}{\alpha^2} \ln \left( 1 + \frac{\alpha x_0}{n \lambda_n (k_1 v - k_2)} \right) + \frac{(n_1 + 1)(h_0 - h)}{c \rho v V} \right] = 0, \quad (16)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты, равные 1,5 и 0,5 соответственно.

Заменив в уравнении (14) величины  $dt$  и  $x_0$  соответствующими значениями из формул (4) и (16) и выразив площадь боковой поверхности  $F$  через  $F = 2\pi x_1 h_k / v$ , получаем зависимость температуры поверхности порошковой прессуемой детали от параметров процесса:

$$T_n = T - \frac{P_k S I}{2\pi(n_1 + 1)} (A + 2v) \frac{(v^n - v_0^n)}{(1 - v_0^n)} \left[ 1 - \frac{x_0}{(n_1 + 2)x_1} \right] \frac{x_0^2}{x_1^2} \frac{V}{\lambda_n (k_1 v - k_2) h_k}. \quad (17)$$

Величина температуры  $T$  рассчитывается по формуле (7). При известных значениях  $T$ ,  $T_0$  и  $x_0$  с помощью выражения (9) находим распределение температуры по сечению прессуемого изделия в течение всего процесса деформирования.

Зависимость (17) позволяет осуществлять расчёт изменения температуры порошковой цилиндрической детали до момента достижения фронтом охлаждения её центральной части, т. е. в течение времени  $t$ , равного  $t_n$ , которому соответствует условие  $x_0$  равно  $x_1$ . Для определения величины  $t_n$  воспользуемся уравнением теплового баланса процесса, включающим количество отведённой аккумулярованной теплоты к моменту  $t_n$  и количество тепла, подведённое к поверхности за счёт теплопроводности за тот же промежуток времени [6]:

$$\frac{\rho c v_n}{n_1 + 2} F_n x_1 (T_n - T_{n,n}) = n_1 \frac{\lambda_n}{2x_1} (k_1 v - k_2) (T_n - T_{n,n}) F_n t_n, \quad (18)$$

где индексом «ц» обозначены соответствующие величины в момент  $t$ , равный  $t_{ц}$ . При этом необходимо отметить, что  $v_{ц} = h_{к}/h_{ц}$  и  $h_{ц} = h_0 - V_{п}t_{ц}$ .

Решение уравнения (18) относительно  $t_{ц}$  даёт зависимость

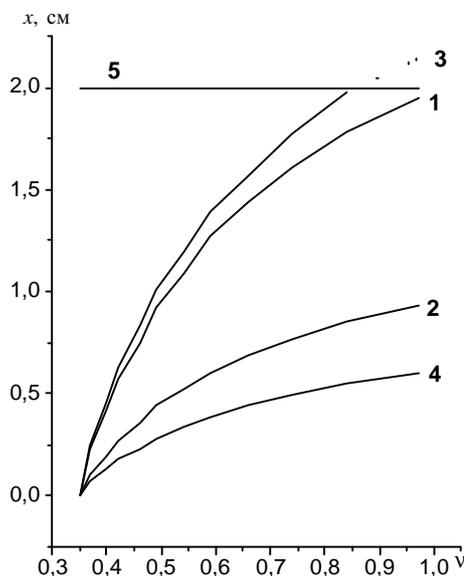
$$t_{ц} = \frac{(k_1 h_{к} - k_2 h_0)}{k_2 V} \left\{ \left[ \frac{2 \rho c x_1^2 h_{к} V}{n_1 \lambda_{п} (n_1 + 2) (k_1 h_{к} - k_2 h_0)^2} + \frac{1}{4} \right]^{1/2} - \frac{1}{2} \right\}. \tag{19}$$

Начиная с момента  $t$ , равного  $t_{ц}$ , процесс деформирования пористого материала протекает в условиях нагревания прессуемого изделия за счёт выделения теплоты деформации и одновременного охлаждения всего его объёма. Анализ показывает, что в реальных технологических процессах продолжительность деформирования материала в большинстве случаев значительно меньше величины  $t_{ц}$ . Отобразим движение фронта охлаждения вглубь прессовки радиусом 2 см в процессе прессования различных металлических порошков (рисунок 3).

Для материалов с высокой теплопроводностью (медь, алюминий) положение фронта охлаждения в конце сжатия близко к центру насыпки (теоретическое значение для меди даже превышает величину радиуса). В случае титана и железа, имеющих меньшее значение  $\lambda$ , фронт охлаждения за время прессования успевает пройти расстояние меньше половины радиуса прессуемой детали. Кроме того, следует учитывать, что с повышением скорости прессования это расстояние будет уменьшаться (см. рисунок 3). Поэтому полученные зависимости, характеризующие тепловые условия формирования прессуемых изделий в течение  $t \leq t_{ц}$ , могут быть эффективно использованы для практических расчётов всего технологического процесса прессования.

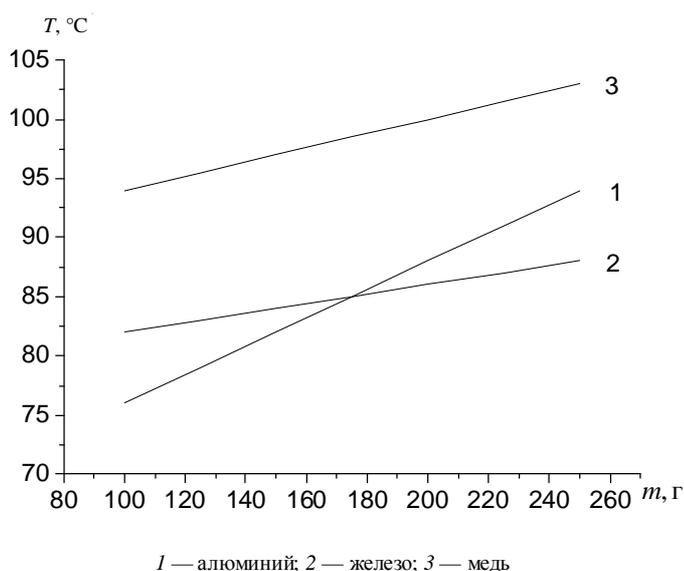
Возвратимся ещё раз к данным работы [7], из которых следует, что величина нагрева прессуемого изделия не зависит от его массы. Это является результатом того, что процесс прессования рассматривался без учёта внешнего трения (взаимодействия материала прессуемого изделия со стенками пресс-формы). Расчёты по формулам (2) и (7), учитывающим данный фактор, показывают, что с увеличением массы прессуемого порошка происходит линейный рост конечной температуры прессуемой детали. Имеется определённая связь между величиной нагрева и массой изделия (рисунок 4). Причём заметно, что для менее плотного материала (алюминий) указанная зависимость выражена более ярко. Данный факт можно объяснить тем, что при увеличении массы порошка на одинаковую величину при равном радиусе цилиндрической пресс-формы высота насыпки возрастает обратно пропорционально плотности материала. Это, в свою очередь, приводит к увеличению хода пуансона, более значительному для порошков с меньшей плотностью, и, следовательно, к увеличению тепловыделения за счёт внешнего трения.

Проведённый анализ теплового режима осуществлялся при условии, что  $T_0$  есть величина постоянная, а это соответствует процессу холодного деформирования пористого материала при постоянной температуре пресс-формы. В некоторых случаях, при интенсивной длительной работе, температура пресс-формы несколько повышается. Учёт влияния изменения её теплового состояния



1 — алюминий; 2 — железо; 3 — медь; 4 — титан; 5 — радиус прессуемого изделия или расстояние от боковой поверхности до центра прессуемого изделия

Рисунок 3 — Зависимость глубины  $x$  проникновения фронта охлаждения вглубь прессуемого изделия от относительной плотности  $\rho$  порошка



**Рисунок 4** — Зависимость конечной температуры  $T$ , °C, прессуемой детали от её массы  $m$

может быть осуществлён с помощью использования значений средней калориметрической температуры [12] и поэтапного расчёта температурного поля прессовки.

**Заключение.** В результате проведённых аналитических исследований изучены особенности холодного прессования дискретных материалов (порошков или гранул) в жёстких матрицах как в условиях теплоизоляции, так и при наличии теплообмена с окружающей средой, а также распределения температурного поля по сечению прессуемого изделия. Выведены соответствующие зависимости, которые можно использовать для практических расчётов всего технологического процесса прессования дискретных материалов.

#### Список цитируемых источников

1. Федорченко, И. М. Основы порошковой металлургии / И. М. Федорченко, Р. А. Андриевский. — Киев : АН УССР, 1961. — 420 с.
2. Жданович, Г. М. Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович. — М. : Металлургия, 1969. — 264 с.
3. Джонс, В. Д. Основы порошковой металлургии / В. Д. Джонс. — М. : Мир, 1965. — 403 с.
4. Бальшин, М. Ю. Основы порошковой металлургии / М. Ю. Бальшин, С. С. Кипарисов. — М. : Металлургия, 1978. — 184 с.
5. Степаненко, А. В. Непрерывное формирование металлических порошков и гранул / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич. — Минск : Наука и техника, 1980. — 256 с.
6. Вейник, А. И. Приближенный расчёт процессов теплопроводности / А. И. Вейник. — Л. : Госэнергоиздат, 1959. — 184 с.
7. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. — М. : Машиностроение, 1979. — 568 с.
8. Механические свойства металлов и сплавов / Л. В. Тихонов [и др.]. — Киев : Наук. думка, 1986. — 566 с.
9. Андриевский, Р. А. Порошковое материаловедение / Р. А. Андриевский. — М. : Металлургия, 1991. — 204 с.
10. Двайт, Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт. — М. : Наука, 1979. — 228 с.
11. Смолянский, М. Л. Таблицы неопределённых интегралов / М. Л. Смолянский. — М. : Наука, 1967. — 216 с.
12. Вейник, А. И. Теория затвердения отливки / А. И. Вейник. — М. : Машгиз, 1960. — 436 с.

Материал поступил в редакцию 19.05.2014 г.

The features of discrete materials cold pressing in rigid matrices, both in terms of thermal insulation and on the condition of heat exchange with the environment, as well as the temperature field distribution over the cross section of pressing are under study. The corresponding relations have been found out.

**Key words:** heat, plastic deformation, discrete composition, powder pressed product, cold pressing.