Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. П. Амосов, А. Ф. Федотов, Моделирование процесса СВС-прессования крупногабаритных кольцевых изделий, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2000, выпуск 9, 89–102

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu34>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 52.23.180.231

26 апреля 2023 г., 17:36:15

*А. П. Амосов, А. Ф. Федотов***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВС-ПРЕССОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Энергетическим методом выполнено моделирование процесса СВС-прессования крупногабаритных кольцевых изделий в оболочке конечных размеров из сыпучего материала. В модели учтены ступенчатое изменение нагрузки, неизотермический характер процесса и особенности структурного состояния продуктов синтеза. Адекватность модели реальному физическому процессу подтверждена экспериментально.

Высокоэффективным способом получения тугоплавких соединений и материалов на их основе является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), протекающий в режиме горения. Исходная шихта в СВС-технологиях представляет собой экзотермическую смесь порошкообразных компонентов и дисперсное состояние шихты наследуется продуктами синтеза. Для получения компактных материалов неостывшие продукты СВС, находящиеся в пластичном состоянии, уплотняют механическим воздействием. Одной из схем технологического компактирования, совмещенного с процессом СВС, является СВС-прессование, при котором деформирование осуществляется в закрытой матрице [1, 2]. Для теплоизоляции от холодного инструмента и дренажирования примесных газов продукты СВС размещаются в оболочке из сыпучего материала.

Показателями качества служат макроскопическая плотность синтезированного материала и размерная точность изделия. Прогнозную оценку плотности и размеров можно получить из аналитической модели процесса совместного деформирования горячей пористой заготовки и сыпучей оболочки. Из-за высокой стоимости исходных материалов и большой трудоемкости процесса проблема моделирования закономерностей уплотнения и формоизменения особо актуальна при изготовлении крупногабаритных изделий [3]. Основу математического моделирования процесса обработки давлением продуктов СВС составляет решение начально-краевой задачи теории пластичности пористых сред. Адекватность математической модели процесса СВС-прессования обусловлена температурным режимом деформации, выбором реологической модели материала, заданием начальных и краевых условий. Температурный режим определяет агрегатное состояние конденсированной фазы, механизм пластического течения и количественные характеристики сопротивления деформации твердой фазы (вязкость или предел текучести). Реологическая модель отражает механизм высокотемпературной деформации твердой фазы (вязкое, вязкопластическое или пластическое течение). Начальные условия описывают распределение плотности до начала деформирования. Граничные условия выражают взаимодействие обрабатываемого материала с инструментом-оболочкой путем задания компонентов вектора скоростей или напряжений.

Необходимые для решения краевой задачи физические и реологические константы материала определяются из натурных [3] или модельных [4] экспериментов. Однако при обработке экспериментальных данных в этих работах не учтены специфические особенности макроструктурного состояния продуктов горения: присутствие расплава легкоплавких компонентов, изменение плотности и объема вещества при химических реакциях, примесное газовыделение. Недостатком модели процесса СВС-прессования, рассмотренной в [3], является использование схемы одноосного прессования пористой заготовки в жесткой пресс-форме без учета оболочки и внешнего трения. При такой схематизации процесса материальные функции, определенные из экспериментальных данных (предел текучести, коэффициент вязкости, функции плотности), относятся не к продуктам синтеза, а ко всей неоднородной среде (продукты СВС и оболочка) фиксированных размеров. Полученные в [3] количественные меры реологических свойств имеют частный характер и не могут быть использованы для описания закономерностей СВС-прессования изделий с другими размерами и формой.

Цель работы - математическое моделирование процесса СВС-прессования крупногабаритных кольцевых изделий с учетом особенностей физического и структурного состояния материала и реальных граничных условий. Моделирование кинематических и силовых параметров процесса выполняется энергетическим методом верхней оценки. В качестве компактируемого

материала рассматриваются продукты горения системы Ti - 2B - 55% (мас.) Ti. Согласно диаграмме состояния продуктом синтеза является твердый сплав состава TiB - 21% (мас.) Ti. Температура горения T_r рассматриваемой системы составляет $T_r = 2120\text{ K}$ [5] и превосходит эвтектическую температуру системы Ti - B, равную 1970 K [6]. Поэтому продукты синтеза состоят из твердых частиц борид титана TiB и боридотитанового расплава.

Рассмотрим задание начальных условий: плотности и размеров продуктов синтеза. Исходным объектом является пористая шихтовая заготовка. Для шихтовой заготовки известны размеры, абсолютная $d_{ш}$ и относительная $\rho_{ш}$ плотности. Параметры макроструктуры продуктов СВС формируются в результате протекания трех процессов, сопровождающихся изменением объема вещества и пористого тела:

- 1) изменение плотности и объема конденсированной фазы в результате химических превращений;
- 2) выделение значительного количества газов, которые были адсорбированы или растворены в исходных компонентах, характерное для системы Ti - B;
- 3) твердо- и жидкофазное спекание продуктов СВС.

Примем следующую модель формирования начальной плотности и размеров синтезируемой заготовки. Будем считать, что при горении, которое протекает при незначительном давлении подпрессовки, за счет внутреннего давления примесного газовыделения сохраняются размеры шихтовой заготовки. Процессом уплотнения при спекании вследствие быстротечности синтеза можно пренебречь. Тогда заготовка из продуктов СВС будет наследовать размеры шихтовой заготовки. Начальная относительная плотность $\rho_{СВС}$ при этом будет равна

$$\rho_{СВС} = \rho_{ш} \frac{d_{ш}}{d_{СВС}}, \quad (1)$$

где $d_{СВС}$ - теоретическая абсолютная плотность беспористых продуктов синтеза. Значения начальной относительной плотности шихты и продуктов синтеза приведены в табл. 1. Отметим заметное отличие $\rho_{СВС}$ от $\rho_{ш}$.

Таблица 1

Параметры плотности и размеров шихтовой заготовки и продуктов синтеза

$d_{ш},$ г/см ³	$\rho_{ш}$	$d_{СВС},$ г/см ³	$\rho_{СВС}$	m_L	ρ_S	$h_{ш},$ мм	$h_{СВС},$ мм	$h_{1ш},$ мм	$h_{1СВС},$ мм
4,0	0,54	5,08	0,425	0,31	0,293	49	42	35	25,5

В нормальных условиях при отсутствии разрыхляющего действия газовыделения начальная плотность продуктов СВС не может быть меньше насыпной плотности дисперсной среды. Пространственную устойчивость дисперсного твердожидкого тела определяет насыпная плотность твердой фазы ρ_S . Относительная плотность твердой фазы ρ_S в пористом твердожидком теле связана с его относительной плотностью ρ соотношением

$$\rho_S = \rho(1 - m_L), \quad (2)$$

где m_L - объемная доля жидкой фазы в компактном материале. Величина m_L связана с абсолютной плотностью твердой фазы (борид титана) d_{TiB} и расплава d_L зависимостью

$$m_L = \frac{d_{TiB} x_L}{d_{TiB} x_L + d_L (1 - x_L)}, \quad (3)$$

где x_L - массовая концентрация жидкой фазы. Охлаждение продуктов синтеза сопровождается кристаллизацией жидкой фазы и уменьшением величины m_L . Температурный интервал кристаллизации $\Delta T = T_r - T_{эвт}$ составляет 150 K и можно ограничиться линейной зависимостью объемной доли расплава m_L от температуры T_K . Из граничных условий для сплава TiB - 21% (мас.) Ti: при $T_r = 2120\text{ K}$ величина $m_L = 0,31$ и при $T_{эвт} = 1970\text{ K}$ - $m_L = 0,28$ получим

$$m_L = 2,3 \cdot 10^{-4} T_K - 0,175. \quad (4)$$

Объемная доля жидкой фазы m_L в беспористом материале при температуре T_r составляет $m_L = 0,31$, и начальная величина ρ_{S0} равна $\rho_{S0} = 0,293$ (см. табл. 1). Насыпная плотность является структурно-чувствительной характеристикой и зависит от формы и размера частиц, состояния их поверхности, фракционного состава и от плотности самого вещества. В присутствии расплава частицы продуктов СВС имеют форму сфер примерно одинакового диаметра. Для монодисперсных сферических частиц со случайной упаковкой теоретическая величина насыпной плот-

ности составляет $\rho_n = 0,52$ [7]. Согласно расчетам начальная плотность ρ_{s0} в продуктах СВС меньше насыпной плотности и это означает, что за счет внутреннего давления примесных газов поддерживается взвешенное состояние твердой фазы.

Результаты экспериментов по кинетике уплотнения продуктов горения системы Ti - В [3] свидетельствуют о резком, почти мгновенном уплотнении в начальный момент под действием только веса подвижных частей пресса. Такую аномально высокую скорость уплотнения следует связать с начальным аэродисперсным состоянием продуктов СВС. Сопротивление деформации в таком состоянии пренебрежимо мало и скорость уплотнения на этой стадии пропорциональна скорости снижения внутреннего давления примесных газов в продуктах синтеза. Продукты горения при этом уплотняются до величины насыпной плотности твердой фазы, которая составляет $\rho_{sh} = 0,52$. Примем, что уплотнение до насыпной плотности происходит при неизменных радиальных размерах включения. Тогда после уплотнения до насыпной плотности ρ_{sh} плотность продуктов СВС составит

$$\rho_{CBC} = \frac{0,52}{1 - m_L}. \quad (5)$$

Высота СВС-заготовки будет равна

$$h_1 = \frac{\rho_{ш}}{\rho_{CBC}} h_{1ш}, \quad (6)$$

а общая высота деформируемого объема -

$$h = h_0 - (h_{1ш} - h_1) \frac{R_1^2 - r_1^2}{R_M^2 - r_M^2}, \quad (7)$$

где h_0 - начальная высота деформируемого объема; $h_{1ш}$ - высота шихтовой заготовки; r_M, r_1 - внутренние радиусы матрицы и заготовки; R_M, R_1 - наружные радиусы матрицы и заготовки. Величины h и h_1 , определяемые зависимостями (6), (7), представляют собой начальные значения, с которых начинается собственно пластическая деформация твердой фазы продуктов синтеза и оболочки. Как и в работе [3], будем рассматривать СВС-прессование с размерами шихтовой заготовки $h_{1ш} = 35$ мм, $r_{1ш} = 74$ мм, $R_{1ш} = 113$ мм в матрице с $h_0 = 49$ мм, $r_M = 67$ мм, $R_M = 120$ мм.

Продукты синтеза саморазогреваются до температуры горения T_g . Технологические задержки во времени, необходимые для сгорания всего объема шихтовой заготовки, завершения процессов догорания и дренажирования примесных газов, приводят к охлаждению продуктов синтеза до температуры компактирования T_k . Температурный режим деформации продуктов СВС является предметом специального исследования. В первом приближении температуру T_k можно оценить из решения задачи об охлаждении пластины в неограниченной среде с граничными условиями IV-го рода [8]. Коэффициенты теплопроводности расплава λ_L и компактного двухкомпонентного твердожидкого материала λ_k рассчитывались по зависимостям [9]

$$\lambda_L = \lambda_{Ti} x_{Ti} + \lambda_{TiB} (1 - x_{Ti}) - 0,72 |\lambda_{Ti} - \lambda_{TiB}| x_{Ti} (1 - x_{Ti}); \quad (8)$$

$$\lambda_k = \lambda_L x_L + \lambda_{TiB} (1 - x_L) - 0,72 |\lambda_L - \lambda_{TiB}| x_L (1 - x_L). \quad (9)$$

Удельную теплоемкость C_L расплава и твердожидкого материала определяли по правилу аддитивности. При расчетах теплофизических свойств принималось [10-12]: $d_{Ti} = 4,52$ г/см³; $\lambda_{Ti} = 18$ Вт/м·К; $C_{Ti} = 700$ Дж/кг·К; $d_{TiB} = 5,26$ г/см³; $C_{TiB} = 916$ Дж/кг·К в твердом состоянии и $C_{TiB} = 1145$ Дж/кг·К в жидком состоянии. Теплопроводность бориды титана TiB не исследована и поэтому использовались данные для дибориды титана TiB₂ для температуры 2100 К: $\lambda_{TiB_2} = 100$ Вт/м·К [10]. Плотность, теплопроводность и теплоемкость пористого материала определяли по зависимостям

$$d_1 = d_{CBC} (1 - \theta); \lambda_1 = \lambda_k (1 - 1,5\theta); C_1 = C_k (1 - \theta) + C_v \theta, \quad (10)$$

где C_v - удельная теплоемкость воздуха, равная $C_v = 1005$ Дж/м·К; θ - пористость включения, связанная с относительной плотностью ρ зависимостью $\theta = 1 - \rho$. Результаты расчета плотности d_1 , коэффициента теплопроводности λ_1 и теплоемкости C_1 представлены в табл. 2. Для песка соответствующие свойства равны [11]: $d_2 = 1,5$ г/см³, $\lambda_2 = 0,326$ Вт/м·К, $C_2 = 795$ Дж/кг·К.

Теплофизические свойства продуктов синтеза

Плотность	$d_1, \text{г/см}^3$	$\lambda_1, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$C_1, \text{Дж/кг}\cdot\text{К}$
$\rho = 1$	5,08	68,7	888
$\rho = 0,425$	2,16	9,44	955
$\rho = 0,74$	3,76	41,9	918

Согласно циклограмме процесса [3] компактирование продуктов синтеза начинается приблизительно через $t = 5$ с после сгорания всего объема шихты. В течение этого времени продукты синтеза находятся во взвешенном состоянии. Высота СВС-заготовки остается равной высоте шихтовой заготовки $h_{\text{СВС}} = h_{\text{ш}} = 35$ мм, а плотность составляет $\rho_{\text{СВС}} = 0,425$. Соответствующие значения теплофизических свойств приведены в табл. 2. Из решения тепловой задачи за время $t = 5$ с средняя по толщине заготовки температура $T_{\text{к}}$ уменьшается с $T_{\text{г}} = 2120 \text{ К}$ до величины $T_{\text{к}} = 2060 \text{ К}$ (рис. 1). При этой температуре начинается процесс прессования, и продукты синтеза практически мгновенно уплотняются до насыпной плотности твердой фазы. При температуре $T_{\text{к}} = 2060 \text{ К}$ объемная доля расплава в продуктах синтеза составляет $m_{\text{л}} = 0,3$. Из соотношения (5) найдем плотность конденсированной фазы $\rho_{\text{СВС}} = 0,74$, а из зависимостей (6), (7) - высоту СВС-заготовки $h_{\text{СВС}} = 25,5$ мм и общую высоту деформируемого объема $h_{\text{СВС}} = 42$ мм (см. табл. 1). Эти значения плотности и размеров заготовки использовались для расчета теплофизических свойств (см. табл. 2), решения тепловой задачи и моделирования процесса деформирования.

Рис. 1. Кинетика остывания продуктов синтеза

Ключевым моментом при моделировании процесса деформирования является выбор реологической модели материала. Теплоизолирующая оболочка (песок) является сыпучей средой. В теории горячего прессования тугоплавкие соединения, в том числе и бориды, считаются вязким телом [13]. Общим физическим свойством продуктов СВС и песчаной оболочки является дисперсное состояние твердой фазы. Деформирование дисперсных сред происходит путем скольжения частиц или за счет их пластической деформации. Причем деформация частиц является неоднородной и пластически деформируется не весь

объем твердой фазы, а лишь его часть - пластический кластер [14]. В сыпучих материалах с пластичными или хрупкими частицами возможны оба механизма деформации. При квазистатическом течении вязкая среда прилипает к граничным поверхностям. Поэтому в дисперсно-вязких телах скольжения частиц нет и деформирование связано только с вязким течением твердой фазы.

Процесс течения тугоплавких соединений происходит по механизму нелинейной ползучести:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n, \quad (11)$$

где $\dot{\epsilon}$ - скорость ползучести; σ - напряжение; n - показатель нелинейности. Температурная зависимость процесса течения определяется коэффициентом A :

$$A = \frac{C}{kT} \exp\left(-\frac{U}{kT}\right), \quad (12)$$

где T - термодинамическая температура; U - энергия активации; k - постоянная Больцмана; C - константа.

Определяющая зависимость между тензором напряжений σ_{ij} и тензором скоростей деформаций e_{ij} для пористого тела с произвольным законом течения твердой фазы имеет вид [15, 16]

$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma(w)}{w} \left[\left(\psi - \frac{1}{3} \varphi \right) e \delta_{ij} + \varphi e_{ij} \right], \quad (13)$$

где w - эквивалентная скорость деформации твердой фазы; $\sigma(w)$ - эквивалентное напряжение; e - скорость изменения объема; δ_{ij} - символ Кронекера; ψ , φ - функции относительной плотности ρ :

$$\psi = \frac{2}{3} \frac{\rho^3}{1-\rho}; \quad \varphi = \rho^2. \quad (14)$$

Эквивалентная скорость деформации твердой фазы w выражается через инварианты макроскопического тензора скоростей деформаций:

$$w = \frac{1}{\sqrt{\alpha \rho}} \sqrt{2\psi e^2 + \varphi H^2}, \quad (15)$$

где α - объемная доля пластически деформируемой твердой фазы; H - интенсивность скоростей деформаций сдвига. Параметр α отражает неоднородный характер деформации частиц твердой фазы дисперсного тела [14] и равен:

$$\alpha = \rho^2 \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0}, \quad (16)$$

где ρ_0 - насыпная плотность порошкового материала.

Для песка в [17] получено соотношение для эффективного объема пластического кластера, которое интегрально учитывает диссипацию энергии внутренним трением и неоднородный характер деформации частиц:

$$\alpha = 1 - \exp \left[-1,3 \left(\ln \frac{0,91 - \rho_0}{0,91 - \rho} \right)^{1,4} \right]. \quad (17)$$

Информация о механизме течения твердой фазы содержится в зависимости между скоростью деформации w и напряжением $\sigma(w)$. Для линейно-вязкого тела эта зависимость имеет вид [16]

$$w = \frac{\sigma(w)}{2\eta_0}, \quad (18)$$

где η_0 - коэффициент сдвиговой вязкости твердой фазы; для нелинейно-вязкого тела

$$w = \frac{1}{2} A_1 \sigma^n(w). \quad (19)$$

Коэффициент $1/2$ в (19) выбран из условия предельного перехода при $n = 1$, когда $A_1^{-1} = \eta_0$. Коэффициент A_1 аналогично (12) определяет температурную зависимость течения. Определяющие соотношения для пористого нелинейно-вязкого тела с учетом (19) имеют вид

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{2}{A_1} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{2\psi e^2 + \varphi H^2}{\alpha \rho} \right)^{\frac{1-n}{2n}} \left[\left(\psi - \frac{1}{3} \varphi \right) e \delta_{ij} + \varphi e_{ij} \right]. \quad (20)$$

Материал оболочки (несвязанный грунт) будем считать жесткопластическим телом [18]. Для жесткопластического тела напряжение $\sigma(w)$ соответствует удвоенному пределу текучести при сдвиге τ_s пластичных или пределу прочности τ_b хрупких частиц. В нашем случае частицы песка являются хрупкими и

$$\sigma(w) = 2\tau_b. \quad (21)$$

Для сыпучей оболочки после подстановки соотношения (21) в (13) получим

$$\sigma_{ij} = \frac{2\tau_b \sqrt{\alpha \rho}}{\sqrt{2\psi e^2 + \varphi H^2}} \left[\left(\psi - \frac{1}{3} \varphi \right) e \delta_{ij} + \varphi e_{ij} \right]. \quad (22)$$

Реологическая модель продуктов СВС должна отражать присутствие жидкой фазы. Сопротивление сдвигу в жидкой фазе на несколько порядков ниже, чем в твердой фазе. В приближении идеальной жидкости сопротивление вязкому течению оказывает только твердая фаза, а жидкую фазу можно рассматривать как несжимаемую пору [19]. Тогда для пористого твердо-

жидкого тела мерой уплотнения будет служить относительная плотность твердой фазы ρ_s . С точки зрения реологии параметр ρ_s является эффективной плотностью твердожидкого тела. Соответственно в определяющих уравнениях (20) при температуре компактирования используется относительная плотность твердой фазы ρ_s . Плотность ρ продуктов синтеза при нормальной температуре после кристаллизации жидкой фазы находится по обратной зависимости (2).

Таблица 3

Параметры нагружения

Эксперимент	q , МПа	t_b , с
1	13,3	4
	25	1
	87	1
	124	8
2	8,8	11
	106	3
	214	2

Экспериментальные исследования закономерностей СВС-прессования крупногабаритных колец рассмотрены в работе [3]. В экспериментах осуществлялось ступенчатое изменение нагрузки с выдержками при постоянном давлении q в течении заданного времени t_b (табл. 3). При анализе процесса на стадии активного прессования будем использовать метод верхней оценки мощности пластической деформации; во время пауз при фиксированном давлении прессования - кинетическое уравнение уплотнения при заданных статических граничных условиях.

Деформируемый осесимметричный объем разобьем на 6 блоков (рис. 2): включение 1 (продукты СВС) и пять блоков оболочки. В реальном объекте включение 1 со всех сторон окружено оболочкой. Поэтому в блоки 3, 4, 5 объединены объемы оболочки, расположенные сверху и снизу включения.

Р и с. 2. Схематизация процесса СВС-прессования кольцевой заготовки

На этапе прессования скорость перемещения пуансона v_0 считается известной. На границах раздела блоков скорости течения непрерывны, но их значения неизвестны. Кинематически допустимое поле скоростей осесимметричного течения зададим из условия однородности объемной деформации e в соответствующем блоке:

$$e = e_z + e_r + e_\varphi = \text{const}, \quad (23)$$

где e_z , e_r , e_φ - компоненты тензора скоростей деформаций:

$$e_z = \frac{dv_z}{dz}; \quad e_r = \frac{dv_r}{dr}; \quad e_\varphi = \frac{v_r}{r}. \quad (24)$$

Здесь v_z , v_r - осевая и радиальная скорости пластического течения материала. Положим, что скорость v_z зависит только от координаты z , а скорость v_r - только от координаты r . Тогда условие (23) можно записать следующим образом:

$$\frac{dv_z}{dz} = \text{const}; \quad \frac{dv_r}{dr} + \frac{v_r}{r} = \text{const}. \quad (25)$$

Решение уравнений (25) имеет вид

$$v_z(z) = C_1 z + C_2; \quad v_r(r) = C_3 r + C_4 r^{-1}. \quad (26)$$

Постоянные интегрирования находим из кинематических краевых условий для каждого блока:

$$\begin{aligned}
v_{z1}(0) &= 0; \quad v_{z1}(h_1) = v_1; \quad v_{r1}(r_1) = u_2; \quad v_{r1}(R_1) = u_6; \quad v_{z2}(0) = 0; \quad v_{z2}(h) = v_0; \quad v_{r2}(r_M) = 0; \\
v_{r2}(r_1) &= u_2; \quad v_{z3}(0) = 0; \quad v_{z3}(h) = v_0; \quad v_{r3}(r_M) = 0; \quad v_{r3}(r_1) = u_3; \quad v_{z4}(h_1) = v_1; \quad v_{z4}(h) = v_0; \\
v_{r4}(r_1) &= u_3; \quad v_{r4}(R_1) = u_5; \quad v_{z5}(0) = 0; \quad v_{z5}(h) = v_0; \quad v_{r5}(R_1) = u_5; \quad v_{r5}(R_M) = 0; \quad v_{z6}(0) = 0; \\
v_{z6}(h) &= v_0; \quad v_{r6}(R_1) = u_6; \quad v_{r6}(R_M) = 0.
\end{aligned}
\tag{27}$$

Из краевых условий (27) определим компоненты тензора скоростей деформаций в каждом блоке деформируемого объема:

$$\begin{aligned}
e_{z1} &= -\frac{v_1}{h_1}; \quad e_{r1} = [(u_6 R_1 - u_2 r_1 - (u_2 R_1 - u_6 r_1) \frac{r_1 R_1}{r^2})] K_1; \quad e_{\phi 1} = [(u_6 R_1 - u_2 r_1 + (u_2 R_1 - u_6 r_1) \frac{r_1 R_1}{r^2})] K_1; \\
e_{z2} &= e_{z3} - \frac{v_0}{h}; \quad e_{r2} = u_2 r_1 (1 - \frac{r_M^2}{r^2}) K_2; \quad e_{\phi 2} = u_2 r_1 (1 + \frac{r_M^2}{r^2}) K_2; \quad e_{r3} = u_3 r_1 (1 - \frac{r_M^2}{r^2}) K_2; \\
e_{\phi 3} &= u_3 r_1 (1 + \frac{r_M^2}{r^2}) K_2; \quad e_{z4} = -\frac{v_0 - v_1}{h - h_1}; \quad e_{r4} = [(u_5 R_1 - u_3 r_1 - (u_3 R_1 - u_5 r_1) \frac{r_1 R_1}{r^2})] K_1; \\
e_{\phi 4} &= [(u_5 R_1 - u_3 r_1 + (u_3 R_1 - u_5 r_1) \frac{r_1 R_1}{r^2})] K_1; \quad e_{z5} = e_{z6} = -\frac{v_0}{h}; \quad e_{r5} = -u_5 R_1 (1 + \frac{R_2^2}{r^2}) K_3; \\
e_{\phi 5} &= -u_5 R_1 (1 - \frac{R_2^2}{r^2}) K_3; \quad e_{r6} = -u_6 R_1 (1 + \frac{R_2^2}{r^2}) K_3; \quad e_{\phi 6} = -u_6 R_1 (1 - \frac{R_2^2}{r^2}) K_3,
\end{aligned}
\tag{28}$$

где h , h_1 - текущие высоты всего деформируемого объема и включения 1. Множители K_1 , K_2 и K_3 равны

$$K_1 = (R_1^2 - r_1^2)^{-1}; \quad K_2 = (r_1^2 - r_M^2)^{-1}; \quad K_3 = (R_M^2 - R_1^2)^{-1}. \tag{29}$$

Нетрудно убедиться, что при принятом поле скоростей скорости объемной деформации блоков не зависят от координат. Это означает, что плотность в каждом блоке во все моменты времени распределяется равномерно.

Соотношения (26) и вытекающие из них уравнения (28) справедливы в случае вязкого сжимаемого включения. При аэродисперсном состоянии вязкость продуктов СВС близка к нулю и они не оказывают сопротивления пластическому течению. Соответственно можно положить, что на границах включения и оболочки напряжения будут равны нулю:

$$\sigma_{z1} = \sigma_{z4} = 0; \quad \sigma_{r1} = \sigma_{r2} = 0; \quad \sigma_{r1} = \sigma_{r6} = 0. \tag{30}$$

Из статических граничных условий (30) вытекают следующие соотношения между осевыми и радиальными компонентами скоростей течения для блока 2:

$$u_2 = \frac{(3\rho_2 - 1)r_1(r_1^2 - r_M^2)}{(3\rho_2 + 1)r_1^2 + 3(1 - \rho_2)r_M^2} \frac{v_0}{h}, \tag{31}$$

для блока 4:

$$v_1 = v_0 - 3(3\rho_4 - 1)(h - h_1) \frac{u_5 R_1 - u_3 r_1}{R_1^2 - r_1^2} \tag{32}$$

и для блока 6:

$$u_6 = -\frac{(3\rho_6 - 1)R_1(R_M^2 - R_1^2)}{(3\rho_6 + 1)R_1^2 + 3(1 - \rho_6)R_M^2} \frac{v_0}{h}. \tag{33}$$

В итоге на начальном этапе прессования, когда продукты СВС находятся в аэродисперсном состоянии, виртуальное поле скоростей определяется двумя независимым параметрами - радиальными скоростями u_3 и u_5 .

При уплотнении включения до беспористого состояния оно становится несжимаемым: $e_1=0$. При несжимаемом включении скорости v_1 и u_2 , u_6 связаны между собой соотношением

$$v_1 = \frac{2h_1(u_6 R_1 - u_2 r_1)}{R_1^2 - r_1^2}, \tag{34}$$

и свободными параметрами являются скорости u_2 , u_3 , u_5 и u_6 .

Действительное поле скоростей будем искать энергетическим методом. При постоянной скорости перемещения пуансона v_0 действительное поле скоростей находится при минимизации следующего функционала [14]:

$$J = Qv_0 = \sum_{i=1}^4 \int_{V_i} D_i dV + \int_{S_{23}} D_{mp} dS + \int_{S_{56}} D_{mp} dS + 2 \left(\int_{S_3} D_{mp} dS + \int_{S_4} D_{mp} dS + \int_{S_5} D_{mp} dS \right), \quad (35)$$

где Q - усилие прессования; D_i - удельная мощность пластической деформации во включении ($i=1$) и оболочке ($i=2, 3, 4, 5, 6$); V_i - объемы соответствующих блоков; S_{23}, S_{56} - площади боковых поверхностей матрицы; S_3, S_4, S_5 - площади поперечных сечений блоков 3, 4 и 5. Множитель 2 в последнем слагаемом учитывает трение на пуансоне и дне матрицы.

Мощность пластической деформации равна

$$D = \sigma_{ij} e_{ij}. \quad (36)$$

Для пористого нелинейно-вязкого тела (включение 1) получим

$$D_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{A_1} \right)^{\frac{1}{n}} (\alpha \rho)^{\frac{n-1}{2n}} (2\psi e^2 + \phi H^2)^{\frac{n+1}{2n}}. \quad (37)$$

Скорость диссипации механической энергии в пористом жесткопластическом теле (оболочка) определяется выражением

$$D = \tau_b \sqrt{\alpha \rho} \sqrt{2\psi e^2 + \phi H^2}. \quad (38)$$

Мощность активных сил, затрачиваемая на преодоление сил трения скольжения, равна

$$D_{mp} = \tau_k v_{ck}, \quad (39)$$

где τ_k - касательные напряжения на контактной поверхности; v_{ck} - скорость скольжения. Величину τ_k примем в соответствии с законом трения Прандтля [20] и с учетом параметра α :

$$\tau_k = \tau_b \rho^{\frac{13}{6}} \sqrt{\alpha}. \quad (40)$$

Скорости скольжения на поверхности пуансона и дне матрицы представляют собой радиальные компоненты скоростей течения в блоках 3, 4 и 5:

$$\begin{aligned} v_{ck3} &= \frac{u_3 r_1}{r_1^2 - r_2^2} \left(r - \frac{1}{r} \right); & v_{ck4} &= \left[(u_6 R_1 - u_2 r_1) r - (u_2 R_1 - u_6 r_1) \frac{r_1 R_1}{r^2} \right] K_1; \\ v_{ck5} &= -\frac{u_6 R_1}{R_1^2 - R_2^2} \left(r - \frac{1}{r} \right); \end{aligned} \quad (41)$$

на боковой поверхности матрицы - осевую компоненту скорости

$$v_{ck6} = v_0 \frac{z}{h}. \quad (42)$$

После определения параметров действительного поля скоростей оценивалось напряженное состояние и усилие прессования (верхняя оценка). Компоненты тензора напряжений для включения 1 рассчитывали по зависимости (20), для оболочки - по зависимости (22).

Усилие прессования Q находили из условия статического равновесия. В отличие от состояния пластического течения при статическом равновесии вместо закона трения Прандтля использовали закон трения Кулона. При наличии внешнего трения осевое давление распределено по высоте матрицы неравномерно: максимальное давление действует на пуансоне и снижается по мере приближения к дну матрицы. Согласно [21] давление q на пуансоне примем равным

$$q = |\sigma_z| + f_{mp} |\sigma_r| \frac{h}{r_M} + f_{mp} |\sigma_r| \frac{h}{R_M}, \quad (43)$$

где f_{mp} - коэффициент трения скольжения Кулона, который связан с относительной плотностью песка зависимостью [17]

$$f_{mp} = 0,63 \rho^{-0,73}. \quad (44)$$

Усилие Q находится суммированием давления q по площади пуансона. При этом следует учесть, что пуансон испытывает давление со стороны трех блоков - 3, 4 и 5. Кроме того, давление на стенку матрицы оказывают четыре блока 2, 3 и 5, 6 с радиальными напряжениями σ_{r2} ,

σ_{r3} , σ_{r5} и σ_{r6} . В качестве расчетных напряжений на внутренней $\sigma_r(r_M)$ и внешней $\sigma_r(R_M)$ поверхностях матрицы примем средневзвешенные радиальные напряжения:

$$\sigma_r(r_M) = \frac{1}{h} [\sigma_{r3}(h - h_1) + \sigma_{r2}h_1]; \quad \sigma_r(R_M) = \frac{1}{h} [\sigma_{r5}(h - h_1) + \sigma_{r6}h_1]. \quad (45)$$

Усилие прессования будет равно

$$Q = \int_{S_3} |\sigma_{z3}| dS + \int_{S_4} |\sigma_{z4}| dS + \int_{S_5} |\sigma_{z5}| dS + \int_{S_{23}} f_{mp} |\sigma_r| dS + \int_{S_{56}} f_{mp} |\sigma_r| dS. \quad (46)$$

Слагаемые в правой части уравнения (46) можно рассматривать как усилия, затрачиваемые соответственно на деформирование включения и центрального блока оболочки Q_4 , внутреннего кольцевого блока оболочки Q_3 , внешнего кольцевого блока оболочки Q_5 и на преодоление силы трения оболочки о стенки матрицы $Q_{\text{от}}$:

$$Q = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_{mp}. \quad (47)$$

С увеличением плотности песка давление на стенку матрицы неограниченно возрастает и вместе с ним возрастает удельная сила трения τ_{mp} . Однако ее значение не может превысить значения, допускаемого условием текучести. Учитывая, что напряжения σ_r , σ_ϕ , σ_z , определяемые формулами (22), являются главными, максимальное касательное напряжение трения Прандтля будет равно [20]

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} |\sigma_z - \sigma_r|. \quad (48)$$

В итоге усилие трения Q_{mp} , расходуемое на преодоление сил внешнего трения оболочки, определяется выражением

$$Q_{mp} = \int_{S_{23}} \tau_{mp} dS + \int_{S_{56}} \tau_{mp} dS, \quad (49)$$

где $\tau_{mp} = f_{mp} |\sigma_r|$ при $f_{mp} |\sigma_r| < \tau_{\max}$; $\tau_{mp} = \tau_{\max}$ при $f_{mp} |\sigma_r| \geq \tau_{\max}$.

Кинетика уплотнения пористой сжимаемой среды описывается уравнением неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho e = 0. \quad (50)$$

В конце этапа активного прессования известны осевые, радиальные и окружные напряжения во включении: σ_{z1} , σ_{r1} , $\sigma_{\phi1}$. Статические граничные условия запишем в виде

$$\sigma_{z1} = -P; \quad \sigma_{r1} = -\xi_1 P; \quad \sigma_{\phi1} = -\xi_2 P, \quad (51)$$

где P - осевое давление на включение 1 со стороны блока 4; ξ_1 , ξ_2 - коэффициенты неизостатичности. Так как компоненты тензора напряжений известны, то уравнение (13) представим в виде зависимости e_{ij} от σ_{ij} :

$$e_{ij} = \frac{w}{\sigma(w)} \left[\frac{1}{\phi} \sigma_{ij} + \left(\frac{1}{3\psi} - \frac{1}{\phi} \right) \sigma \cdot \delta_{ij} \right]. \quad (52)$$

Из уравнения неразрывности (50) с использованием соотношений (19) и (51) получим уравнение кинетики уплотнения нелинейно-вязкого пористого кольца при постоянных компонентах тензора напряжений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{A_1 P^n}{2} \left(\frac{F}{3\psi} \right)^n \left[\frac{2\psi}{\alpha \rho} + \frac{6\psi^2}{\alpha \rho \phi} \cdot \frac{\Phi^2}{F^2} \right]^{\frac{n-1}{2}}, \quad (53)$$

где функции неизостатичности Φ и F имеют вид

$$\Phi^2 = (1 - \xi_1)^2 + (\xi_1 - \xi_2)^2 + (1 - \xi_2)^2; \quad F = 1 + \xi_1 + \xi_2. \quad (54)$$

При выводе зависимостей размеров кольцевой заготовки от ее плотности примем условие однородности скорости изменения объема e и плотности ρ . Тогда поле скоростей будет описываться уравнениями (26). Из статических граничных условий (51) найдем постоянные интегрирования:

$$C_1 = -\frac{v_1}{h_1}; \quad C_2 = 0; \quad C_3 = \frac{\psi e}{\phi \sigma} \frac{\sigma_{R1} R_1^2 - \sigma_{r1} r_1^2}{R_1^2 - r_1^2} - \left(\frac{3\psi - 1}{3\phi} \right) e; \quad C_4 = \frac{\psi}{\phi} e \frac{\sigma_{R1} - \sigma_{r1}}{\sigma} \frac{r_1^2 R_1^2}{R_1^2 - r_1^2}, \quad (55)$$

где σ_{R1}, σ_{r1} - радиальные напряжения на внешней и внутренней поверхностях кольца; σ - среднее напряжение. Компоненты поля скоростей связаны с геометрическими размерами кольца соотношениями

$$v_1 = \frac{dh_1}{dt}; \quad u_2 = \frac{dr_1}{dt}; \quad u_6 = \frac{dR_1}{dt}. \quad (56)$$

Из зависимостей (52), (55) и (56) найдем закон изменения высоты включения h_1 :

$$h_1 = h_{10} \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1-\rho}{1-\rho_0} \right)^{\frac{2(1-\xi_1-\xi_2)}{3(1+\xi_1+\xi_2)}} \quad (57)$$

и соотношение между внешним R_1 и внутренним r_1 радиусами кольца:

$$R_1 = r_1 \frac{R_{10}}{r_{10}} \left(\frac{1-\rho}{1-\rho_0} \right)^{\frac{2(\sigma_{r1}-\sigma_{R1})}{3\sigma}}. \quad (58)$$

Из закона сохранения массы получим

$$R_1^2 - r_1^2 = (R_{10}^2 - r_{10}^2) \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1-\rho}{1-\rho_0} \right)^{\frac{2(1-\xi_1-\xi_2)}{3(1+\xi_1+\xi_2)}}. \quad (59)$$

Совместное решение уравнений (58) и (59) дает закон изменения внутреннего радиуса r_1

$$r_1^2 = \frac{(R_{10}^2 - r_{10}^2)r_{10}^2}{R_{10}^2 f_2^2(\rho) - r_{10}^2} f_1(\rho) \quad (60)$$

и внешнего радиуса R_1

$$R_1^2 = \frac{(R_{10}^2 - r_{10}^2)R_{10}^2}{R_{10}^2 f_2^2(\rho) - r_{10}^2} f_1(\rho) \cdot f_2^2(\rho) \quad (61)$$

на этапе выдержке при постоянном давлении. Функции плотности $f_1(\rho)$ и $f_2(\rho)$ равны

$$f_1(\rho) = \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1-\rho}{1-\rho_0} \right)^{\frac{2(1-\xi_1-\xi_2)}{3(1+\xi_1+\xi_2)}}; \quad f_2(\rho) = \left(\frac{1-\rho}{1-\rho_0} \right)^{\frac{2(\sigma_{r1}-\sigma_{R1})}{3\sigma}}. \quad (62)$$

В полученных зависимостях индекс 0 относится к плотности и размерам заготовки в начале этапа выдержки под давлением.

Реологические свойства продуктов СВС определяются термокинетическими параметрами нелинейной ползучести борида титана: показателем нелинейности n , предэкспонентом C и энергией активации U . Экспериментальные значения этих параметров получены в [13] при горячем изотермическом прессовании порошков тугоплавких соединений в жесткой пресс-форме. При выводе аналитического уравнения использовалась объемная вязкость ζ линейного тела, равная

$$\zeta = \eta_0 \frac{\rho^3}{1-\rho}. \quad (63)$$

В нашем случае значение функции ψ (14) приводит к выражению

$$\zeta = \frac{4}{3} \eta_0 \frac{\rho^3}{1-\rho}, \quad (64)$$

т.е. отличается от используемого в [12] коэффициентом 4/3. Для нелинейно-вязкого тела коэффициент A_1 будет связан с коэффициентом A из (12) и [13] зависимостью

$$A_1 = \left(\frac{4}{3} \right)^{\frac{n+1}{2}} A. \quad (65)$$

Величина энергии активации U и показатель нелинейности n инвариантны к формам представления объемной вязкости.

В связи с отсутствием в литературе данных по параметрам ползучести для борида титана TiB в расчетах использовались физические константы для диборида титана TiB₂ [13]: показатель нелинейности $n = 3$, энергия активации $U = 10 \cdot 10^{-19}$ Дж, предэкспонент $C = 1,6 \cdot 10^{-31}$ м⁷Н²/с. С учетом соотношения (65) константа C будет равна $C = 2,84 \cdot 10^{-31}$ м⁷Н²/с. Материальные кон-

станты реологической модели песчаной оболочки равны [17]: предел прочности частиц песка $\tau_b = 115$ МПа, насыпная плотность $\rho_0 = 0,61$.

Моделирование процесса на этапе активного прессования выполняли методом ступенчатого нагружения. При этом задавали шаг изменения времени Δt , за который происходит осадка деформируемого объема на величину $\Delta h = v_0 \Delta t$. После каждого временного шага нагружения определяли новые значения температуры прессования T_k и объемной доли жидкой фазы m_L . В каждом интервале Δt величины, зависящие от времени (относительная плотность ρ и размеры включения), считаются постоянными. Минимум функционала (35) находится методом координатного спуска с погрешностью вычисления скоростей 0,01 мм/с. Численное интегрирование при вычислении мощности и компонентов тензора напряжений в блоках выполнялось по методу Симпсона. После минимизации функционала (35) и определения параметров поля скоростей вычисляются приращения осевых и радиальных размеров блоков за время Δt и определяются новые значения размеров блоков и плотность материала в них. Плотность включения на k -том шаге находится из закона сохранения массы. При расчете плотности материала оболочки граница между блоками 3-4 и 5-6 считалась проницаемой. В начале каждого шага радиусы блоков 3, 4 и 5 равны радиусам включений: $R_3 = r_1$; $r_4 = r_1$; $R_4 = R_1$; $r_5 = R_1$. При изменении радиусов блоков массоперенос через границу блоков 3 и 4 задается соотношением

$$\Delta M_{34} = \pi \rho (h - h_1) (R_3^2 - r_1^2). \quad (66)$$

При $R_{3k} > r_{1k}$ перетекание материала происходит из блока 3 в блок 4 и плотность ρ в выражении (66) равна $\rho = \rho_{3k}$; при $R_{3k} < r_{1k}$ поток массы направлен в противоположную сторону и $\rho = \rho_{4k}$. Массоперенос через границу блоков 4-5 равен

$$\Delta M_{45} = \pi \rho (h - h_1) (r_5^2 - R_1^2). \quad (67)$$

Массы ΔM_{34} и ΔM_{45} алгебраически суммируются с массами соответствующих блоков, и рассчитывается средняя по объему плотность материала в блоке 4 и объединенных блоках 2-3 и 5-6. Такое осреднение приводит к скачкообразному изменению плотности блоков. На этапе выдержки при фиксированном давлении принималось, что плотность блоков оболочки не изменяется. При изменении радиальных размеров включения радиальные границы блоков считались проницаемыми. Массоперенос через эти границы определялся по зависимостям (66), (67). Текущая высота деформируемого объема h находилась из закона сохранения массы оболочки.

Р и с. 3. Изменение относительной плотности ρ (1, 2, 4) и давления q (3) при СВС-прессовании по режимам эксперимента 1 (а) и 2 (б): 1 - результаты эксперимента; 2 - расчет; 4 - расчет по модели [3]

Уравнение (53) решалось методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом интегрирования $\Delta t = 0,25$ с. Расчетные значения граничных условий (51) представлены в табл. 4. Для расчета коэффициентов неизостатичности ξ_1 и ξ_2 использовались компоненты тензора напряжений для среднего r_{cp} радиуса заготовки: $\sigma_{z1}(r_{cp})$, $\sigma_{r1}(r_{cp})$, $\sigma_{\phi1}(r_{cp})$. Интегрируемой функцией являлась плотность ρ_s и после расчета ρ_s определялась плотность ρ после кристаллизации жидкой фазы. На каждом шаге интегрирования по зависимостям (57), (60), (61) выполнялся расчет текущей высоты и радиусов изделия.

Результаты расчета, представленные на рис. 3, показывают достаточно хорошее соответствие с экспериментальными данными. Это свидетельствует об адекватности принятых физических моделей структурного состояния и связанных с ними теплофизических и реологических свойств продуктов синтеза, а также о достоверности модели пластического течения песчаной оболочки. Наибольшая скорость уплотнения характерна для начального аэродисперсного со-

Р и с. 4. Изменение высоты заготовки h (1) и давления q (2) в эксперименте 2

стояния продуктов синтеза. Динамика уплотнения контролируется скоростью дренажирования примесных газов. После формирования пространственно устойчивой структуры скорость уплотнения связана с давлением и временем нелинейной зависимостью (53). Соответственно при ступенчатом изменении нагрузки наблюдаются плавные перегибы, но скорость уплотнения $\dot{\rho} > 0$. Более резко выражено влияние характера нагружения на изменение общей высоты деформируемого объема h (рис. 4). На кривых $h(t)$ на этапах с постоянным давлением прессования величина h практически не изменяется: $h \approx const$. В работе

[3] принята модель деформирования в жесткой пресс-форме и для оценки текущей плотности ρ использовалось соотношение

$$\rho = \rho_0 \frac{h_0}{h}. \quad (68)$$

Согласно (68) при $h = const$ скорость уплотнения $\dot{\rho} = 0$ и плотность не изменяется. Это послужило основанием для вывода о пороговом характере течения и в работе [3] принята модель линейного вязкопластического материала. Вместе с тем известные данные о высокотемпературной реологии тугоплавких соединений [13] и результаты настоящего исследования свидетельствуют в пользу модели вязкого течения.

Предлагаемая модель процесса позволяет получить информацию о конечных размерах заготовки и силовых параметрах процесса.

Закономерности формоизменения при обработке давлением определяются схемой напряженного состояния. В табл. 4 приведены расчетные значения параметров напряженного состояния заготовки. Деформирование кольцевой заготовки происходит в условиях неравномерного трехосного сжатия. Причем внутреннее и внешнее радиальные давления одинаковы по величине: $\sigma_{r1} = \sigma_{R1}$. Осевое давление во включении $P = -\sigma_{z1}(r_{cp})$ меньше по величине, чем давление прессования q .

Таблица 4

Параметры напряженного состояния заготовки

q , МПа	σ_{r1} , МПа	σ_{R1} , МПа	σ , МПа	$\sigma_{z1}(r_{cp})$, МПа	$\sigma_{r1}(r_{cp})$, МПа	$\sigma_{\phi1}(r_{cp})$, МПа	ξ_1	ξ_2
13,3	-3	-3	-5	-8	-3	-3	0,375	0,375
25	-10	-10	-17	-31	-10	-10	0,322	0,322
87	-32	-32	-46	-72	-32	-33	0,444	0,458
124	-44	-45	-61	-93	-45	-46	0,484	0,495
8,8	-3	-3	-5	-8	-3	-3	0,375	0,375
106	-39	-39	-55	-87	-39	-40	0,448	0,460
214	-71	-73	-98	-144	-72	-77	0,500	0,535

Количественной характеристикой неравноосности объемного сжатия служат коэффициенты неизостатичности ξ_1 и ξ_2 . При гидростатическом сжатии $\xi_1 = \xi_2 = 1$. Полученные оценки коэффициентов ξ_1 и ξ_2 показывают, что осевое напряжение σ_{z1} существенно выше, чем радиальное σ_{r1} и окружное $\sigma_{\phi 1}$ напряжения. Деформирование в условиях неравноосного сжатия с малыми значениями ξ_1 , ξ_2 обуславливает существенно меньшую радиальную деформацию заготовки по сравнению с осевой. Это подтверждают и результаты расчета конечных размеров заготовки (табл. 5). Так, осадка составляет ~50%, а радиальные размеры заготовки практически не изменяются.

Таблица 5

Характеристики формоизменения заготовки

Эксперимент	$h_{1ш}$, мм	$h_{1СВС}$, мм	r_{10} , мм	r_1 , мм	R_{10} , мм	R_1 , мм
1	35	18,21	74	73,82	113	113,3
2	35	18,24	74	73,62	113	113,1

Важное значение для технологического проектирования и оптимизации процесса СВС-прессования имеет информация о силовых параметрах процесса. В табл. 6 приведены данные о составляющих общего усилия прессования Q . Наибольшее усилие приходится на деформирова-

Таблица 6

Структура усилия прессования Q

Эксперимент	q , МПа	Q , кН	Q_3 , кН	Q_4 , кН	Q_5 , кН	$Q_{тр}$, кН
1	13,3	414	29	300	51	44
	25	778	62	495	91	150
	87	2707	213	1647	317	593
	124	3860	287	2379	424	860
2	8,8	274	24,1	176	44	37
	106	3300	209	2148	377	535
	214	6660	422	4231	616	1275

ние центрального блока 4 и расположенной под ним заготовки. Заметен вклад в общий баланс усилий силы трения $Q_{тр}$: на преодоления силы внешнего трения оболочки расходуется ~ 20% от общего усилия прессования Q .

Таким образом, процесс СВС-прессования, как объект моделирования, представляет собой сложную систему. Адекватное описание процесса возможно при корректном задании параметров состояния материала (температура, фазовый состав, структурное состояние), реологических свойств продуктов синтеза и материала оболочки и краевых условий процесса деформирования. Особенность объекта состоит в том, что в продуктах синтеза происходит самоформирование исходного структурного состояния (начальных условий) и это отличает СВС-прессование от прессования инертных порошков. Предложенная модель позволила получить количественные оценки закономерностей уплотнения и формоизменения продуктов синтеза и может быть использована для прогнозирования конечных свойств материала и оптимизации технологических режимов процесса.

Работа выполнена в рамках фундаментальных исследований НИИ проблем надежности механических систем Самарского государственного технического университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левашов Е. А. и др. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Бином, 1999, 176 с.
2. Кванин В.Л., Балихина Н.Т., Боровинская И. П. Пресс-форма и установка для получения крупногабаритных твердосплавных изделий методом силового СВС-компактирования // КШП. 1992. № 5. С. 14-19.
3. Горовой В. А. и др. Закономерности силового СВС-компактирования крупногабаритных твердосплавных изделий // КШП. 1996. № 1. С. 14-18.

4. Бучацкий Л. М. , Столин А. М. Высокотемпературная реология СВС-материалов // ИФЖ. 1992. Т. 63. № 5. С. 593-604.
5. Падюков К. Л. и др. Закономерности поведения синтетического алмаза в волне горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // ИФЖ. 1992. Т. 63. № 5. С. 577-582.
6. Самсонов Г. В., Серебрякова Т. И., Неронов В. А. Бориды. М.: Атомиздат, 1975. 376 с.
7. Хатпелл Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976. 560 с.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 600 с.
9. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 328 с.
10. Андриевский А.Р., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. Челябинск: Металлургия, 1989. 368 с.
11. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.
12. Новиков Н.П., Боровинская И.П., Мерзжанов А.Г. Термодинамический анализ реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975. С. 174-188.
13. Ковальченко М.С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов. Киев: Наукова думка, 1980. 240с.
14. Федотов А. Ф. Моделирование и исследование процесса деформирования горячих продуктов СВС в оболочке из сыпучего материала. // Вестн. СамГТУ. Сер. «Физ. – мат. науки». Самара: СамГТУ, 1999. Вып. 7. С. 92-106.
15. Скороход В.В., Штерн М.Б., Мартынова И.Ф. Теория нелинейно-вязкого и пластического поведения пористых материалов // Порошковая металлургия. 1987. № 8. С. 23-30.
16. Скороход В.В., Олевский Е.А., Штерн М.Б. Континуальная теория спекания // Порошковая металлургия. 1993. № 1. С. 22-27.
17. Федотов А.Ф. Характеристики пластичности и внешнего трения сыпучих материалов теплоизолирующей оболочки для прессования продуктов СВС // Огнеупоры и техническая керамика. 1997. № 7. С. 14-17.
18. Друккер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика. 1975. Вып. 2. С. 166-177.
19. Федотов А.Ф. Реологические свойства пористого вязкого тела с жидкой фазой // Изв. вузов. Машиностроение. 1991. № 10-12. С. 8-14.
20. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. М.: Машиностроение, 1989. 168 с.
21. Феноменологические теории прессования порошков. Киев: Наукова думка, 1985. 140 с.