Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Л. Кванин, Н. Т. Балихина, В. П. Радченко, А. Ф. Федотов, М. А. Ермоленко, Конечно-элементная модель процесса СВС-прессования крупногабаритных кольцевых изделий со ступенчатым нагружением, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2003, выпуск 19, 97–106

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu147>

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: 3.85.183.62

26 апреля 2023 г., 03:57:17

В.Л. Кванин, Н.Т. Балихина, В.П. Радченко, А. Ф. Федотов, М.А. Ермоленко

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СВС-ПРЕССОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ СО СТУПЕНЧАТЫМ НАГРУЖЕНИЕМ

Методом конечных элементов 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 [1]. Для получения компактных материалов неостывшие продукты СВС, находящиеся в пластичном состоянии, уплотняют механическим воздействием. Одной из схем компактирования, совмещенного с процессом СВС, является СВС-прессование, при котором деформирование осуществляется в закрытой матрице [1, 2]. С целью теплоизоляции от холодного инструмента и дренажирования примесных газов продукты СВС размещаются в теплоизолирующей сыпучей оболочке.

Эффективное управление технологическими параметрами процесса СВС-прессования с целью получения требуемых свойств изделия неразрывно связано с разработкой математической 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 формообразования особо актуальна при изготовлении крупногабаритных изделий. В известных работах для описания закономерностей процесса СВС-прессования крупногабаритных кольцевых изделий рассматривается схема одноосного прессования пористой заготовки в жесткой пресс-форме без оболочки и внешнего трения [3]. Такая упрощенная модель не позволяет исследовать влияние свойств и размеров оболочки на процессы уплотнения и формообразования изделия. Кроме того, в этой работе не учтены специфические особенности макроструктурного состояния продуктов горения: присутствие расплава легкоплавких компонентов, а также изменение плотности и объема вещества при химических реакциях. Цель настоящей работы – математическое моделирование процесса СВС-прессования крупногабаритных кольцевых изделий с учетом особенностей физического и структурного состояния материала и реальных граничных условий.

Технологический цикл процесса СВС-прессования состоит из трех основных стадий: синтез в режиме горения, задержка и прессование. При горении происходит теплообмен уже образовавшихся и вновь образующихся продуктов СВС с окружающей средой. После завершения синтеза во всем объеме заготовки следует временная пауза (задержка), обычно связанная с временем срабатывания исполнительной системы пресса или протеканием процессов дореагирования. На стадии задержки в теплообмене участвует весь объем синтезированного материала. После задержки осуществляется прессование продуктов синтеза совместно с оболочкой. На стадии прессования продолжается теплообмен, приводящий к охлаждению продуктов синтеза и нагреву оболочки. При этом происходит изменение реологических свойств материала заготовки и оболочки. Одновременно уплотнение материалов приводит к изменению их теплофизических свойств. На определенной стадии уплотнения в порошковых материалах образуется закрытая пористость. С ростом давления прессования происходит выдавливание газов из закрытых пор через объем прессовки к ее поверхности. При малых габаритных размерах этот процесс реализуется во всем объеме прессовки и компактирование производят при монотонном нагружении, когда давление прессования непрерывно повышается. С увеличением размеров прессовки процесс выдавливания зажатых в порах газов из внутренних объемов затрудняется, и они остаются рыхлыми. Поэтому для обеспечения дренажирования поровых газов при прессовании крупногабаритных изделий (КГИ) осуществляют ступенчатое нагружение – этапы подъема давления чередуются с паузами при фиксированном давлении. Этим технология СВС-прессования КГИ отличается от технологии получения малогабаритных заготовок.

Закономерности уплотнения и формообразования при СВС-прессовании контролируются двумя физическими процессами: теплообменом и пластическим деформированием заготовки и оболочки при ступенчатом нагружении. Сначала рассмотрим процесс теплообмена, который предшествует процессу деформирования. Для быстрого и равномерного сжигания крупногабаритной шихтовой заготовки используется система многоточечного зажигания [4]. Это обеспечивает быстрое выравнивание температуры по объему заготовки на стадии синтеза-горения и можно принять, что в начальный момент времени заготовка мгновенно нагревается до температуры горения T_r . Тогда температурная задача формулируется следующим образом.

Р и с. 1. Расчетная схема процесса СВС-прессования кольцевых заготовок:
1 – заготовка; 2 – оболочка; 3 – матрица;
4 – пуансон

Заготовка в форме кольца толщиной h_1 , внешним радиусом R_1 и внутренним радиусом r_1 помещена в сыпучую оболочку и стальную матрицу. Размеры заготовки, оболочки и матрицы известны. В начальный момент времени температура заготовки равна температуре горения T_r ; температура оболочки и инструмента – температуре среды T_s . Требуется найти температурное поле $T(x, t)$ системы трех соприкасающихся тел в произвольный момент времени t цикла прессования. Здесь x – вектор координат точек системы. Расчетная схема приведена на рис. 1. В связи с осевой симметрией рассматривается половина меридионального сечения в цилиндрических координатах r и z .

Математическая постановка задачи осе-

симметричного теплообмена включает:

1) систему трех дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$C_i d_i \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i(r, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где T_i – температура тел; C_i – удельная теплоемкость; d_i – плотность; λ_i – коэффициент теплопроводности; t – время; i – индекс тела системы;

2) граничные условия: на границах заготовка-оболочка и оболочка-инструмент условия IV-го рода:

$$I_1 \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial n} = I_2 \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial n}; \quad T_1(x, t) = T_2(x, t); \quad I_2 \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial n} = I_3 \frac{\partial T_3(x, t)}{\partial n}; \quad T_2(x, t) = T_3(x, t); \quad (2)$$

на границе инструмент-окружающая среда условия III-го рода:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(x, t)}{\partial n} + \alpha [T_3(x, t) - T_s] = 0, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; n – нормаль к граничной поверхности;

3) начальные условия:

$$T_1(x, 0) = T_r; \quad T_2(x, 0) = T_s; \quad T_3(x, 0) = T_s. \quad (4)$$

Необходимые для решения задачи теплообмена теплофизические свойства продуктов СВС определялись расчетным путем. В качестве компактируемого материала рассматривались продукты горения системы Ti–12%(мас.) В. Согласно диаграмме состояния продуктом синтеза является твердый сплав состава TiB–40% (мас.) Ti. Температура горения T_r рассматриваемой системы составляет $T_r = 1800$ °С и превосходит эвтектическую температуру системы Ti– TiB, равную 1667 °С [5]. Соответственно продукты синтеза при температуре горения представляют собой двухкомпонентную смесь твердых частиц моноборида титана TiB и боридотитанового расплава, который в свою очередь является двухкомпонентным раствором. Теплофизические свойства смесей рассчитывали по известным методикам для расплава [6] и механической смеси с взаимопроникающими компонентами [7] с использованием справочных данных для индивидуальных компонентов [8–10]. Теплопроводность моноборида титана TiB не исследована и поэтому использовались данные для диборида титана TiB₂ при температуре 1800 °С: $\lambda_{TiB_2} = 100$

Вт/м·К [9]. Получены следующие значения теплофизических свойств продуктов синтеза: $d_{\text{СВС}} = 4,98 \text{ г/см}^3$; $\lambda_{\text{СВС}} = 53,8 \text{ Вт/м·К}$; $C_{\text{СВС}} = 873 \text{ Дж/кг·К}$. Эти характеристики относятся к компактно-му сплаву TiB–40% Ti. В дальнейшем характеристики, относящиеся к заготовке, будут иметь индекс 1; к оболочке – индекс 2 и к инструменту – индекс 3. В соответствии с такой индексацией плотность пористых продуктов синтеза будет равна:

$$d_1 = d_{\text{СВС}} \cdot \rho_1, \quad (5)$$

где ρ_1 – относительная плотность продуктов СВС. Для расчета коэффициента теплопроводности пористых продуктов синтеза λ_1 использовалась зависимость [11]:

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{СВС}} (1,5 \cdot \rho_1 - 0,5). \quad (6)$$

Удельную теплоемкость пористых продуктов синтеза C_1 определяли по правилу аддитивности:

$$C_1 = C_{\text{СВС}} \cdot \rho_1 + C_V (1 - \rho_1), \quad (7)$$

где C_V – удельная теплоемкость воздуха, равная $C_V = 1005 \text{ Дж/м·К}$.

Для оценки начальной относительной плотности продуктов синтеза ρ_{10} принималось, что синтезированная заготовка наследует размеры шихтовой заготовки [12]. Тогда плотность синтезированной заготовки будет определяться изменением объема конденсированной фазы при химических реакциях. При принятых допущениях начальная относительная плотность ρ_{10} синтезированного материала рассчитывается по зависимости

$$\rho_{10} = \rho_{\text{ш}} \frac{d_{\text{ш}}}{d_{\text{СВС}}}, \quad (8)$$

где $\rho_{\text{ш}}$; $d_{\text{ш}}$ – соответственно относительная и размерная плотность шихтовой заготовки. В экспериментах шихтовая заготовка спрессовывалась до относительной плотности $\rho_{\text{ш}} = 0,66$ и расчетное значение начальной относительной плотности ρ_{10} составляло $\rho_{10} = 0,55$.

В отличие от компонентов продуктов СВС, для которых теплофизические свойства установлены в компактном состоянии, для песка и подобных ему материалов эти свойства определены для порошкообразного состояния. По аналогии с соотношениями (5)–(7) получим следующие зависимости теплофизических свойств сыпучих материалов оболочки 2 от относительной плотности ρ_2 :

$$d_2 = d_{2\text{к}} \cdot \rho_2; \quad \lambda_2 = \lambda_{2\text{к}} (1,5 \cdot \rho_2 - 0,5); \quad C_2 = C_{2\text{к}} \rho_2 + C_V (1 - \rho_2), \quad (9)$$

где $d_{2\text{к}}$; $\lambda_{2\text{к}}$; $C_{2\text{к}}$ – плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость беспористого материала оболочки. Для определения неизвестных $d_{2\text{к}}$, $\lambda_{2\text{к}}$, $C_{2\text{к}}$ достаточно иметь данные о свойствах материала при каком-либо одном значении плотности ρ_2 . Используя данные работы [12] о насыпной плотности $\rho_{20} = 0,61$ и работы [8] о теплофизических свойствах песка, были получены экстраполированные значения искомых параметров для беспористого состояния: $d_{2\text{к}} = 2,46 \text{ г/см}^3$; $\lambda_{2\text{к}} = 0,785 \text{ Вт/м·К}$; $C_{2\text{к}} = 660 \text{ Дж/кг·К}$. Для стального инструмента 3 использовались справочные данные [8]: $d_3 = 7,8 \text{ г/см}^3$; $\lambda_3 = 32 \text{ Вт/м·К}$; $C_3 = 567 \text{ Дж/кг·К}$. Коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене принимался равным $\alpha = 44 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Краевая задача пластического деформирования формулируется следующим образом. Горячая пористая заготовка, имеющая форму кольца, помещена в теплоизолирующую оболочку и в закрытую матрицу. Заготовка является сжимаемым нелинейновязким телом; оболочка – сыпучим материалом с хрупкими частицами. Заготовку вместе с оболочкой сжимают жестким пуансоном по заданной ступенчатой программе нагружения. Скорость перемещения пуансона v_0 на этапе активного нагружения мала и поле напряжений удовлетворяет условию квазистатичности. На границе заготовки и оболочки выполняется условие полного сцепления по всей поверхности контакта. На границе оболочки с инструментом действуют силы трения. Требуется определить конечные размеры и распределение плотности в материале заготовки и оболочки. Для описания процесса деформирования используется континуальная теория пластического течения сжимаемых сред. Решение сформулированной задачи состоит в нахождении в каждый момент времени t вектора скоростей $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ и относительной плотности $\rho(\mathbf{x}, t)$ точек деформируемой среды. При осесимметричном деформировании поле скоростей определяется двумя компонентами вектора $\mathbf{v}$: осевой скоростью $v_z(r, z, t)$ и радиальной скоростью $v_r(r, z, t)$. Расчетная схема представлена на рис. 1.

Математическая постановка задачи включает:

1) соотношения Коши

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); \quad (10)$$

2) уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0; \quad (11)$$

3) уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0; \quad (12)$$

4) определяющие соотношения между тензором напряжений σ_{ij} и тензором скоростей деформаций e_{ij} для пористой нелинейно-вязкой заготовки

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{2}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\alpha_1}{2\psi e^2 + \phi H^2} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \left[\left(\psi - \frac{1}{3} \phi \right) e \delta_{ij} + \phi e_{ij} \right] \quad (13)$$

и для сыпучей оболочки

$$\sigma_{ij} = \frac{2\tau_b(T)\sqrt{\alpha_2}}{\sqrt{2\psi e^2 + \phi H^2}} \left[\left(\psi - \frac{1}{3} \phi \right) e \delta_{ij} + \phi e_{ij} \right]. \quad (14)$$

В определяющих соотношениях (13), (14) обозначено: e – скорость изменения объема; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; δ_{ij} – символ Кронекера; ψ , ϕ , – функции относительной плотности ρ : $\psi = 2 \cdot \rho^3 / 3 \cdot (1 - \rho)$, $\phi = \rho^2$; $\tau_b(T)$ – предел прочности на сдвиг частиц сыпучей среды; n – показатель нелинейности течения вещества вязкой заготовки. Параметры α_1 в (13) и α_2 в (14) отражают неоднородный характер деформации частиц твердой фазы дисперсного тела [12] и принимаются равными

$$\alpha_1 = \rho^2 \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0}; \quad \alpha_2 = 1 - \exp \left[-0,71 \left(\ln \frac{1 - \rho_0}{1 - \rho} \right)^{1,45} \right], \quad (15)$$

где ρ_0 – насыпная плотность. Выражение для α_2 получено при обобщении данных работы [13] о пределе прочности песка и аппроксимирующей зависимости $\alpha_2(\rho)$ работы [14].

Температурная зависимость процесса вязкого течения заготовки определяется коэффициентом A :

$$A = \frac{C}{kT} \exp \left(-\frac{U}{kT} \right). \quad (16)$$

Здесь T – абсолютная температура; U – энергия активации; k – постоянная Больцмана; C – константа. Анализ литературных данных по температурной зависимости прочности материалов на основе кварца [15] показал, что температурную зависимость $\tau_b(T)$ для песка можно принять в виде

$$\tau_b(T) = \tau_{bo} \exp \left[- \left(\ln \frac{T_{пл} - T_p}{T_{пл} - T} \right)^2 \right], \quad (17)$$

где τ_{bo} – предел прочности на сдвиг частиц песка при комнатной температуре; $T_{пл}$; T_p – соответственно температуры плавления и начала разупрочнения кварца ($T_{пл} = 1723$ °C; $T_p = 1000$ °C). При температуре $T \leq 1000$ °C прочность не изменяется: $\tau_b(T) = \tau_{bo} = 160$ МПа [13]. При локальном разогреве оболочки свыше температуры плавления песка принималась модель сжимаемой идеальной жидкости.

Система уравнений (10)–(14) дополняется начальными и граничными условиями. Начальное условие задает начальное распределение плотности в заготовке 1 и оболочке 2:

$$\rho_1(\mathbf{x}, 0) = \rho_{10}; \quad \rho_2(\mathbf{x}, 0) = \rho_{20}. \quad (18)$$

Начальная плотность оболочки равна насыпной плотности ее материала ρ_{20} . Для песка насыпная плотность составляет $\rho_{20} = 0,61$ [14]. Расчет начальной плотности продуктов синтеза ρ_{10} был рассмотрен выше. В начальный момент времени плотность по объемам заготовки и оболочки распределена равномерно.

Рассмотрим граничные условия. На границе заготовка-оболочка условие полного сцепления представляет собой равенство скоростей на всей поверхности контакта: $\mathbf{v}_{k1}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{v}_{k2}(\mathbf{x}, t)$.

На внешней границе оболочки при наличии трения имеют место смешанные граничные условия. Кинематическая часть граничных условий представляет собой условие непроницаемости:

$$v_r(r_2, z, t) = 0; \quad v_z(r, 0, t) = 0; \quad v_z(r, h, t) = -v_0; \quad v_r(R_2, z, t) = 0. \quad (19)$$

Статическая часть граничных условий выражается законом трения на контактной поверхности через соотношение между нормальной S_n и касательной t составляющими вектора поверхностных напряжений. При малых нормальных давлениях действует закон трения Кулона: удельная сила трения скольжения $\tau_{ск}$ пропорциональна нормальному давлению σ_n : $\tau_{ск} = f|\sigma_n|$, где f - коэффициент трения. С увеличением плотности коэффициент трения Кулона возрастает. Для песка эта зависимость имеет вид [14]: $f = 0,63\rho^{0,73}$.

Величина $\tau_{ск}$ не может превышать максимального значения τ_{max} , допускаемого условием текучести. Следуя работе [16], положим, что τ_{max} равно пределу текучести дисперсной среды на сдвиг: $\tau_{max} = \tau_{сд}$ (закон трения Прандтля). Тогда при скольжении песчаной оболочки по внутренней поверхности инструмента будем иметь:

$$\tau_{ск} = \begin{cases} f|\sigma_n| & \text{при } f|\sigma_n| < \tau_{сд}; \\ \tau_{сд} & \text{при } f|\sigma_n| \geq \tau_{сд}. \end{cases} \quad (20)$$

Удельная сила трения $\tau_{сд}$ принимается пропорциональной площади живого сечения [16]. В рамках используемой реологической модели (14) живое сечение порошкового тела численно равно относительной доле контактного объема α_2 [17]. Тогда напряжение $\tau_{сд}$ будет равно $\tau_{сд} = \alpha_2 \tau_s$, где τ_s максимальный предел текучести на сдвиг дисперсной среды. При чистом сдвиге $\sigma = 0$ и из определяющих соотношений (14) следует: $\tau_s^2 = T^2 = \alpha_2 \phi \tau_b^2$. С учетом выражения для функции плотности ϕ получим величину удельной силы трения $\tau_{сд}$:

$$\tau_{сд} = \tau_b \rho \alpha_2^{3/2}. \quad (21)$$

Выше уже отмечалось, что при температуре горения продукты синтеза находятся в твердо-жидком состоянии. В приближении идеальной жидкости сопротивление деформации оказывает только твердая фаза [18] и параметры α_1 , ψ и ϕ являются функциями объемной доли твердой фазы ρ_s . Объемная доля твердой фазы ρ_s связана с относительной плотностью ρ пористого твердожидкого тела соотношением

$$\rho_s = \rho (1 - m_L). \quad (22)$$

Расчеты показали, что изменение объема расплава m_L при охлаждении сплава TiB-40%Ti от температуры горения до эвтектической температуры можно аппроксимировать следующей линейной зависимостью:

$$m_L(T) = 3,3 \cdot 10^{-4} T - 0,187. \quad (23)$$

В зависимости $m_L(T)$ температура выражена в градусах Кельвина. При охлаждении сплава ниже эвтектической температуры $T_{эвт}$ происходит кристаллизация боридотитанового расплава и жидкая фаза исчезает. Температура $T_{эвт}$ является равновесной температурой кристаллизации и для начала кристаллизации необходима определенная степень переохлаждения. Принималось, что переохлаждение составляет 50 градусов и при охлаждении от температуры $T_{эвт}$ до температуры полной кристаллизации $T_{кр}$ объемная доля жидкой фазы изменяется по линейному закону от $m_L(T_{эвт})$ до $m_L(T_{кр}) = 0$. Если объемная доля твердой фазы ρ_s будет меньше теоретического значения насыпной плотности, составляющей $\rho_{sh} = 0,53$ [19], то материал заготовки не оказывает сопротивления деформации [12].

Поставленная краевая задача пластического деформирования решалась методом конечных элементов. Методика и алгоритм решения краевой задачи изотермического пластического деформирования со смешанными граничными условиями подробно рассмотрены в [20]. При не-изотермическом процессе в пределах каждого шага решения задачи пластического течения дополнительно выполняется шаг решения задачи нестационарного теплообмена.

Моделировался процесс СВС-прессования кольцевых заготовок со следующими размерами шихтовой заготовки [3]: начальные радиусы заготовки $r_{10} = 74$ мм; $R_{10} = 113$ мм; радиусы матрицы $r_2 = 67$ мм; $R_2 = 120$ мм; начальная высота шихтовой заготовки $h_{10} = 35$ мм; начальная высота всего деформируемого объема $h_0 = 49$ мм. Скорость перемещения плунжера прессы принималась равной $v_0 = 5$ мм/с. Время задержки прессования составляло $t_3 = 5$ с. В экспериментах

осуществлялось ступенчатое изменение нагрузки с выдержками при постоянном давлении q в течение заданного времени t_b . Программы нагружения взяты из работы [3].

Для описания нелинейновязкого течения продуктов синтеза необходимы количественные данные об энергии активации U , константе C и показателе течения n . В литературе этих данных для моноборида титана TiB и материалов на его основе нет. Искомые физические константы были определены следующим образом. Индекс течения n для тугоплавких боридов равен $n = 3$ [21]. Это значение было принято и для моноборида титана. Энергию активации U находили, опираясь на правило Ле Клера, согласно которому для металлов с одинаковым типом кристаллической решетки и валентностью отношение энергии активации к температуре плавления $T_{пл}$, выраженной в энергетических единицах $kT_{пл}$, должно быть примерно постоянным [22]. В работе [21] показано, что это правило выполняется и для тугоплавких карбидов и боридов переходных металлов. В частности, для диборида титана TiB₂ отношение $U/(kT_{пл})$ равно $U/(kT_{пл}) = 23,9$. Из последнего соотношения для температуры плавления моноборида титана $T_{пл} = 2500$ К [23] получим $U = 8,22 \cdot 10^{-19}$ Дж. Величину постоянной C в уравнении (16) находили с привлечением экспериментальных данных работы [3]. Для модели линейно вязкого тела коэффициент сдвиговой вязкости μ сплава TiB–40% Ti в интервале температур цикла прессования примерно постоянен и равен $\mu = 570$ МПа·с [3]. В этой же работе приведены экспериментальные данные по скорости уплотнения dp/dt для текущей плотности ρ , что позволяет из уравнения неразрывности (11) вычислить скорость объемной деформации:

$$e = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt}. \quad (24)$$

Из определяющих соотношений (13) получим зависимость между скоростью объемной деформации и средним напряжением $\sigma = 1/3 \sigma_{ij}$ для линейновязкого ($n = 1$) и нелинейновязкого тел (соответственно):

$$\sigma = 2\mu\psi e; \quad (25)$$

$$\sigma = \left(\frac{2}{A}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\alpha_1}{2\psi e^2 + \phi H^2}\right)^{\frac{n-1}{2n}} \psi e. \quad (26)$$

Из условия равенства напряжений (25) и (26) в характерной точке температурно-временной траектории $\rho(T, t)$ можно найти искомую величину константы C . В качестве расчетной точки принимались параметры состояния для второго эксперимента в момент начала выдержки при давлении $q = 106$ МПа. В этот момент времени относительная плотность и скорость уплотнения соответственно равны: $\rho = 0,92$ и $dp/dt = 0,0364$ с⁻¹. Из решения тепловой задачи получено, что в этот же момент времени средняя по объему температура заготовки составляет $T = 1660$ °С и сплав содержит жидкую фазу в объеме $m_L = 0,327$. Соответственно структурные характеристики продуктов синтеза α_1 , ψ и ϕ рассчитывались по объемной доле твердой фазы ρ_s , которая согласно (22) равна $\rho_s = 0,616$. Данные о сдвиговой вязкости μ в работе [3] получены из модели одноосного прессования в жесткой матрице. В этом случае интенсивность скоростей деформации сдвига выражается через скорость объемной деформации: $H = -2/\sqrt{3} e$. С использованием приведенных соотношений и их количественных оценок определили значение константы C : $C = 2,97 \cdot 10^{-32}$ м⁷·Н⁻²/с.

При СВС-прессовании КГИ теплоизолирующей оболочкой служит не песок, а жесткие песчаные фильтры с относительной плотностью $\rho_\phi = 0,5$ и пределом прочности на сжатие 2,5 МПа [4]. Шихтовая заготовка размещается внутри жестких фильтров с радиальными зазорами порядка $\Delta r \approx 1$ мм. С таким же радиальным зазором фильтры устанавливаются и внутри матрицы. Конструктивные особенности теплоизоляции КГИ учитывались в математических моделях теплообмена и пластического деформирования следующим образом. Так как полость между заготовкой и фильтрами заполняется горячими газами, выделившимися при горении, то принималось, что на стадии задержки прессования теплообмена заготовки с оболочкой не происходит. При силовом нагружении происходит разрушение жестких фильтров и они превращаются в песок насыпной плотности ρ_{20} . Уплотнение сыпучей оболочки, образовавшейся после разрушения жестких фильтров, начнется после того, как заполнится весь объем радиальных зазо-

ров. До этого момента теплоизолирующая оболочка не оказывает сопротивления деформации и происходит свободная осадка заготовки без изменения ее радиальных размеров на величину

$$\Delta h_1 = \frac{V_3 \rho_{20}}{S_1 \rho_\phi}, \quad (27)$$

где V_3 – объем радиальных зазоров; S_1 – площадь основания заготовки. Для рассматриваемых размеров кольца при $\Delta r = 1$ мм; $\rho_\phi = 0,5$ и $\rho_{20} = 0,61$ начальная высота заготовки при свободной осадке уменьшится на величину $\Delta h_1 = 4,3$ мм и составит $h_1 = h_{10} - \Delta h_1 \approx 31$ мм. Соответственно с этого момента времени наступает полный контакт заготовки с оболочкой и она начинает оказывать сопротивление деформации. При свободной осадке теплообмен учитывался только на опорных поверхностях заготовки. Боковые поверхности считались полностью теплоизолированными.

Результаты расчета, представленные на рис. 2, показывают достаточно хорошее соответствие с экспериментальными данными. Это свидетельствует об адекватности принятых физических моделей и связанных с ними теплофизических и реологических свойств продуктов синтеза и песчаной оболочки. Следует отметить, что при умеренных давлениях прессования, не превышающих $q = 100$ МПа, расчет показывает более высокую степень уплотнения по сравнению с экспериментом. Аналогичный результат получен и в работе [3]. Это расхождение может быть связано с образованием закрытой пористости и неполным выдавливанием зажатых в порах газов из внутренних объемов при давлениях прессования до $q = 100$ МПа. Эффект образования закрытой пористости в рамках рассматриваемой модели не описывается, что, вероятно, и является причиной расхождения результатов расчета и эксперимента в диапазоне умеренных давлений.

По результатам расчетов для второго эксперимента рассмотрим закономерности теплообмена и формообразования. На рис. 3 приведены расчетные данные о динамике распределения температуры по радиусу r и высоте z в заготовке и оболочке в их средних сечениях. Температурное поле в заготовке близко к однородному. Максимальная разность температур в центре $T_{ц}$ и на контактной поверхности заготовки T_k не превышает $\Delta T = T_{ц} - T_k = 50$ °С, что меньше 3%. Это позволяет для оценочных расчетов теплового режима при СВС-прессовании в песчаной оболочке использовать приближение однородного температурного поля.

Скорость охлаждения КГИ в песчаной оболочке невысокая и составляет в среднем 8 град/с (рис. 4). Это в два раза меньше, чем скорость охлаждения малогабаритных изделий [24]. Вместе с тем непрерывное охлаждение приводит к постепенному уменьшению способности материала к пластическому течению и уплотнению. Практический интерес представляет оценка темпера-

Р и с. 2. Зависимости относительной плотности заготовки ρ и давления q от времени t :
1, 2, 3 – номера экспериментов; ———— - эксперимент; - - - - - расчет

турно-временных и силовых параметров, при которых в неизотермических условиях можно получить беспористый материал.

Следуя работам [25, 26] температуру, при которой синтезированный материал сохраняет способность к пластическому течению и уплотнению, будем называть температурой живучести $T_{\text{ж}}$, а время охлаждения до температуры $T_{\text{ж}}$ – временем живучести $t_{\text{ж}}$. Соответственно длительность цикла обработки давлением остывающих продуктов СВС не должно превышать времени живучести.

Р и с. 3. Распределение температуры по радиусу r (а) и высоте z (б) заготовки и оболочки в различные моменты времени t : 1 – $t = t_3 = 5$ с; $t = 15$ с; $t = 20$ с

Р и с. 4. Кинетика изменения средней температуры заготовки T (1) и объема жидкой фазы m_L (2)

решение об охлаждении бесконечного слоя вещества, помещенного в неограниченную среду с граничными условиями 4-го рода. Описание процесса пластического деформирования производится по схеме одностороннего прессования в жесткой матрице без оболочки. Естественно, что эти оценки носят качественный характер. Математические модели процессов теплообмена и пластического деформирования, учитывающие реальное структурное состояние материалов и граничные условия позволяют более точно оценить искомые температурно-временные и силовые параметры. В дальнейшем под температурой живучести $T_{\text{ж}}$ будем понимать температуру, при которой для заданных размеров заготовки и оболочки, а также величины давления прессования q заготовка уплотняется до беспористого или близкого к нему состояния. Исходным технологическим параметром является заданное давление прессования q , величина которого определяется усилием пресса и габаритными размерами заготовки и инструмента. Процедура оценки температурно-временных рамок неизотермического процесса СВС-прессования состоит в следующем. Сначала для заданного давления q находится температура живучести материала. Затем по кривой охлаждения заготовки определяется время живучести и, соответственно, максимально допустимая длительность цикла обработки давлением остывающих продуктов СВС.

Для определения параметров $T_{\text{ж}}$ и $t_{\text{ж}}$ процесса СВС-прессования кольцевых заготовок из сплава TiB-40% Ti выполнена серия вычислительных экспериментов по изотермическому прессованию с монотонным нагружением. Варьировалась температура заготовки и определялось давление q , при котором средняя по объему относительная плотность прессованной заготовки составляет не менее $\rho_1 = 0,99$. Результаты расчетов приведены на рис. 5. Как и следовало ожидать, с уменьшением температуры увеличивается величина давления q , необходимая для получения беспористого материала. Вместе с тем следует отметить ряд особенностей на кривой $q(T_{\text{ж}})$. Во-первых, при температуре $T_{\text{ж}} \geq 1700$ °C беспористый материал получается при одном и том же давлении, равном $q \approx 33$ МПа. Этот результат следует связать с твердожидким состоя-

нием уплотняемого материала. Вязкость жидкой фазы на несколько порядков меньше вязкости твердого тела и сопротивление деформации твердожидкого тела определяется реологией и количеством твердой фазы. Дисперсное твердожидкое тело является механически устойчивым к внешнему силовому воздействию, если объемная доля твердой фазы ρ_s будет равна насыпной плотности ρ_{SH} . Для монодисперсных сферических частиц теоретическое значение насыпной плотности составляет $\rho_{SH} = 0,53$ [19]. Если $\rho_s \leq 0,53$, то твердая фаза находится во взвешенном состоянии и материал не оказывает сопротивления деформации. При температурах $T \geq T_{эвт} = 1677$ °С объемная доля жидкой фазы m_L в сплаве TiB-40% Ti составляет $m_L \geq 0,46$. Согласно [25] объемная доля твердой фазы ρ_s при уплотнении сплава от начального состояния с $\rho_{10} = 0,55$ до беспористого состояния с $\rho_1 = 1$ находится в пределах $\rho_s = 0,3 - 0,54$. Это меньше или незначительно больше, чем насыпная плотность ρ_{SH} . Частицы твердой фазы изолированы расплавом от контакта друг с другом и материал заготовки не оказывает сопротивления деформации в течение всего процесса прессования. Поэтому при $T \geq T_{эвт}$ величина давления q полностью определяется механическими свойствами оболочки и не зависит от свойств заготовки.

При температурах $T < T_{эвт}$ объема расплава недостаточно, чтобы исключить контактное взаимодействие и деформирование частиц твердой фазы. Поэтому с уменьшением температуры и количества расплава увеличивается объем пластически деформируемой твердой фазы и расчетное давление прессования q . При температуре, меньшей чем температура полной кристаллизации $T_{кр} = T_{эвт} - 50$ °С, жидкой фазы нет, и отмечается резкое увеличение давления q с уменьшением температуры. Практический опыт СВС-прессования подтверждает, что при давлениях прессования $q = 200$ -250 МПа необходи – мым условием

Р и с. 5. Зависимость «температура – давление» для достижения $\rho = 0,99$

получения высокоплотного материала на основе тугоплавких соединений является наличие в нем жидкой фазы. Для рассматриваемого варианта максимальное давление составляет $q = 225$ МПа. Из диаграммы $q-T_{ж}$ получим значение $T_{ж} \approx 1630$ °С и из зависимости $T(t)$ – допустимое время цикла нагружения $t_{ж} \approx 20$ с. Этот результат хорошо согласуется с длительностью цикла ступенчатого нагружения в экспериментах.

Р и с. 6. Форма сечения синтезированной заготовки

Наряду с плотностью материала качество СВС-прессованного изделия определяется его размерной точностью. На рис. 6 приведена расчетная форма сечения кольцевой заготовки. Опорные и боковые поверхности заготовки имеют вогнутую форму в виде кратера с плоским дном. В среднем сечении внутренний радиус прессованной заготовки составляет

$r_1 = 75,4$ мм и увеличился по сравнению с начальным размером $r_1 = 74$ мм на 1,4 мм; наружный радиус, наоборот, уменьшился с $R_2 = 113$ мм до $R_2 = 111,8$ мм. Одной из причин искажения формы является неоднородность температурного поля, которое формируется в заготовке. Температура объемов, расположенных по периметру заготовки вблизи границ контактного теплообмена с оболочкой на 50-100 °С меньше температуры центральных объемов. Наиболее «холодными» являются объемы, находящиеся в окрестности ребер заготовки. При прессовании «холодные» объемы деформируются и уплотняются в меньшей степени, чем горячие, и происходит искажение формы заготовки. Кроме температурного фактора, неоднородное деформирование

при СВС-прессовании связано с различием реологических свойств заготовки и оболочки. В частности, поверхность заготовки становится вогнутой, если сопротивление деформации продуктов синтеза меньше, чем прочность материала оболочки [20].

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. Разработанная математическая модель позволила получить количественные оценки закономерностей уплотнения и формообразования крупногабаритных кольцевых изделий и может быть использована для прогнозирования конечных свойств материала и оптимизации технологических режимов процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов. Черноголовка: ИСМАН, 1998. 512 с.
2. Левашов Е.А. и др. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Бинум, 1999. 176 с.
3. Горовой В.А. и др. Закономерности силового СВС-компактирования крупногабаритных твердосплавных изделий // КШП. 1996. № 1. С. 14-18.
4. Кванин В.Л., Баихина Н.Т., Боровинская И.П. Пресс-форма и установка для получения крупногабаритных твердосплавных изделий методом силового СВС-компактирования // КШП. 1992. № 5. С. 14-19.
5. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Геронов В.А. Бориды. М.: Атомиздат, 1975. 376 с.
6. Филиппов Л.П. Исследование теплопроводности жидкостей. М.: Изд-во МГУ, 1970. 239 с.
7. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
8. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.
9. Андриевский Р.А., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. Челябинск: Металлургия, 1989. 368 с.
10. Смитлз К.Дж. Металлы: Справочник. М.: Металлургия, 1980. 447 с.
11. Оделевский В.И. расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // Журнал техн. физики. 1959. Т. 21. № 6. С. 678-682.
12. Федотов А.Ф. Моделирование и исследование процесса деформирования горячих продуктов СВС в оболочке из сыпучего материала // Вестн. СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 1999. Вып. 7. С. 92-106.
13. Амосов А.П., Федотов А.Ф. Вариант условия пластичности порошковых материалов // Порошковая металлургия. 2000. № 3-4. С. 4-10.
14. 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.
15. Кайнарский И.С. Динас. М.: ГНТИЛ, 1961. 470 с.
16. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. М.: Машиностроение, 1989. 168 с.
17. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Металлургия, 1972. 336 с.
18. Федотов А.Ф. Реологические свойства пористого вязкого тела с жидкой фазой // Изв. вузов. Машиностроение. 1997. № 10-12. С. 8-14.
19. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. М.: Металлургия, 1991. 205 с.
20. Радченко В.П., Федотов А.Ф., Ермоленко М.А. численное решение краевой задачи пластического деформирования при СВС-прессовании в оболочке из однородного сыпучего материала // Изв. вузов. Машиностроение. 2002. № 1. С. 15-24.
21. Ковальченко М.С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов. Киев: Наукова думка, 1980. 240 с.
22. Ле Клер А.Д. Теоретическое описание диффузии в металлах с объемноцентрированной кубической решеткой // Диффузия в металлах с объемноцентрированной решеткой. М.: Металлургия, 1969. С. 11-34.
23. Новиков Н.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Термодинамический анализ реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка. 1975. С. 174-188.
24. Епишин К.Л., Питюлин А.Н., Мержанов А.Г. Уплотнение материалов, образующихся при СВС // Порошковая металлургия. 1992. № 6. С. 14-19.
25. Подлесов В.В. и др. Технологические основы СВС-экструзии // Инж. - физ. журнал. 1992. Т. 63. № 5. С. 525-537.
26. Щербаков В.А., Грядунов А.Н., Штейнберг А.С. Макрокинетика процесса СВС-компактирования // Инж. - физ. журнал. 1992. Т. 63. № 5. С. 583-592.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Минобразования Российской Федерации по фундаментальным исследованиям в области технических наук, шифр проекта Т02 - 06.4 - 3704.

Поступила 26.06.2003 г.