

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СПЕКАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИТОВ

Н.Г.Бураго¹, И.С.Никитин²

¹ ИИМех РАН им. А.Ю. Ишлинского, Москва

² РГТУ-МАТИ им. К.Э.Циолковского, Москва

В настоящей работе обычная методика расчета упругопластических деформаций [1] адаптирована к задачам теории спекания. Исходные уравнения имеют вид [2-3]

$$d\mathbf{x}/dt = \mathbf{v}, \quad d\rho/dt = -\rho\nabla \cdot \mathbf{v}, \quad \rho d\mathbf{v}/dt = \nabla\boldsymbol{\sigma} + \rho\mathbf{g}, \quad \boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}'$$

$$\boldsymbol{\sigma}' = 2\mu(\boldsymbol{\varepsilon}' - \boldsymbol{\varepsilon}_p'), \quad \rho c_v dT/dt = \boldsymbol{\sigma} : \nabla \otimes \mathbf{v} + \nabla \cdot (k_T \nabla T) + \rho r, \quad p = -(\boldsymbol{\sigma} : \mathbf{I})/3$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = \boldsymbol{\varepsilon} - (\boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{I})\mathbf{I}/3, \quad \mathbf{L} = \nabla \otimes \mathbf{v}, \quad d\boldsymbol{\varepsilon}/dt = (\mathbf{L} + \mathbf{L}^T)/2 - \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{L} - \mathbf{L}^T \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$$

$$\mathbf{e}_p = d\boldsymbol{\varepsilon}_p/dt + \boldsymbol{\varepsilon}_p \cdot \mathbf{L} + \mathbf{L}^T \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_p = (\mathbf{e}_p : \mathbf{I})\mathbf{I}/3 + H(\boldsymbol{\sigma}' : \boldsymbol{\sigma}' - k_p^2)\lambda_p \boldsymbol{\sigma}', \quad d\theta/dt = -H(\Phi_\theta)\lambda_\theta$$

$$p = K\rho/\rho_p (\ln(\rho/\rho_p) + \beta(T - T_0)), \quad \mu = \mu(T, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_p, \omega, \theta), \quad K = K(T, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_p, \omega, \theta)$$

$$k_p = k_p(T, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_p, \omega, \theta), \quad \lambda_p = \lambda_p(T, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_p, \omega, \theta), \quad \lambda_\theta = \lambda_\theta(T, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_p, \omega, \theta), \quad s_\omega = s_\omega(T, \omega)$$

$$d\omega/dt = -H(\omega)\lambda_\omega(p + s_\omega), \quad \mathbf{e}_p : \mathbf{I} = 1/(1 - \omega)d\omega/dt, \quad \rho_p = \rho_0(1 - \omega)$$

где первые 6 строчек содержат обычные уравнения термо-упруго-пластической среды со скалярной повреждаемостью θ , записанные с использованием традиционных обозначений. Дополнительно введена пористость ω , которая меняется в пределах $0 < \omega < \omega_{\max} < 1$, где ω_{\max} - максимальная пористость, при которой из порошков образуется начальное деформируемое тело ("green body"). Учтена зависимость свойств упругопластичности, теплоемкости и теплопроводности (K, μ, k_p, c_v, k) от температуры, деформации, повреждаемости и пористости ω . Отметим, что \mathbf{I} - единичный тензор, $H()$ - функция Хевисайда, β - коэффициент температурного расширения-сжатия, T_0 - комнатная температура, ρ_0 - плотность двухкомпонентной смеси порошков при нулевой пористости, $s_\omega \geq 0$ - напряжение спекания, $\Phi_\theta(T, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_p, \omega, \theta) \geq 0$ - критерий разрушения. Напряжение спекания играет ключевую роль интегральной характеристики капиллярных сил, действующих на поверхности активных пор и стремящихся схлопнуть эти поры. Поры становятся активными при нагревании, когда легкоплавкая компонента

смеси порошков расплавляется и смачивает частицы порошка тугоплавкой компоненты, таким образом материал уплотняется под действием капиллярных сил.

Выражения зависимостей для коэффициентов, определяющих свойства среды и напряжение спекания, принимались в простейшем виде

$$K = 975(1 - \omega), \mu = 369(1 - \omega), \beta = 0, k_T = 1 - \omega, k_p = 1 - \omega, \lambda_\omega = 0.1, \lambda_\theta = 0, s_\omega = 0$$

на стадии прессования и

$$K = 975(1 - \omega), \mu = 369(1 - \omega), \beta = 0, k_T = 1 - \omega, k_p = 1 - \omega, \lambda_\omega = 0.1, \lambda_\theta = 0, s_\omega = 5\omega$$

на стадии спекания. Кроме того принималось $c_V = 1, \omega_{\max} = 0.5$.

Ниже показаны типичные результаты расчета спекания изделия из двухкомпонентной смеси порошков для стадий холодного прессования (Рис. 1-4), выдержки (Рис. 5, 6) и спекания (Рис. 7, 8). При $t = 0$ имеем $\omega = \omega_{\max}$. Начальное состояние полагалось разгруженным. Трение на контактных границах считалось пренебрежимо малым, отлипание принималось во внимание. Жесткая пресс-форма имела подвижный верхний штамп, движение которого видно на рисунках. Процесс являлся квазистатическим.

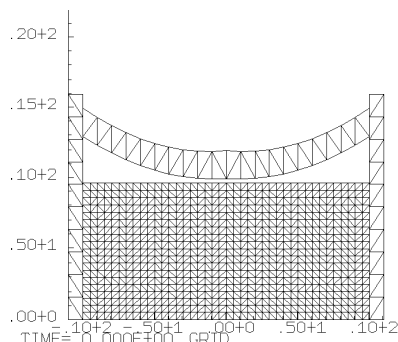


Рис.1 Сетка до холодного прессования

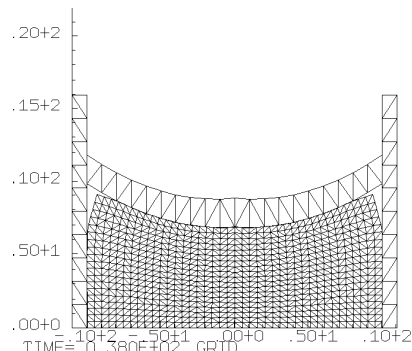


Рис. 2 Сетка после холодного прессования

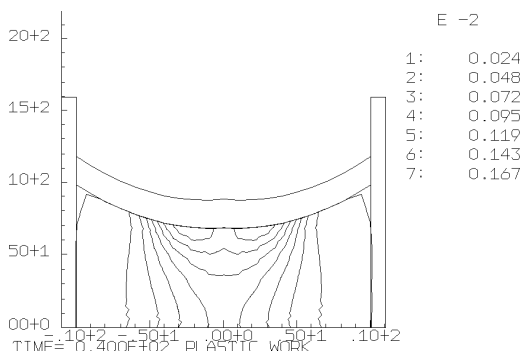


Рис. 3. Пластическая работа из-за холодного прессования

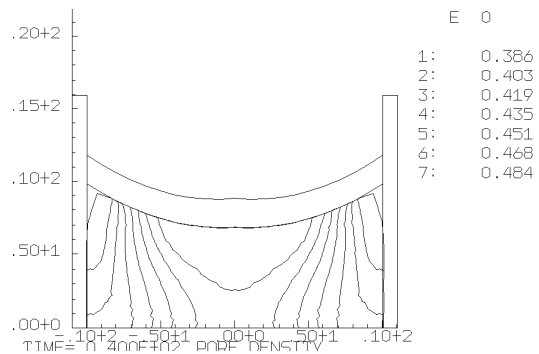


Рис. 4. Пористость после прессования

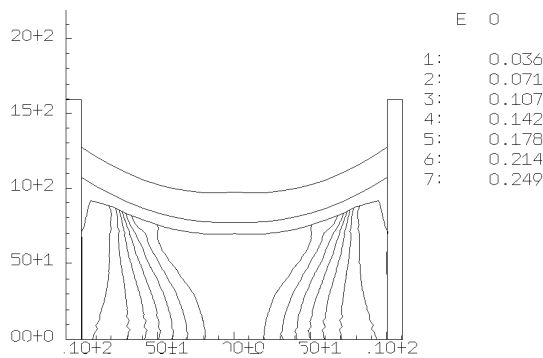


Рис. 5. Температура из-за нагрева образца после прессования и выдержки

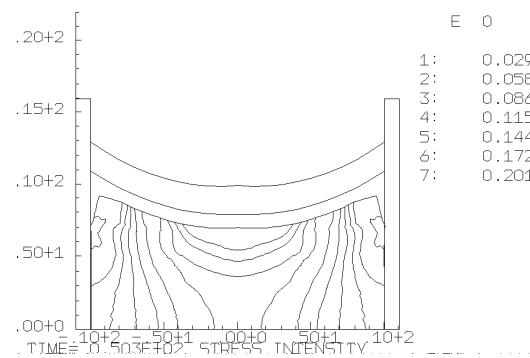


Рис. 6. Интенсивность остаточных напряжений после прессования и выдержки

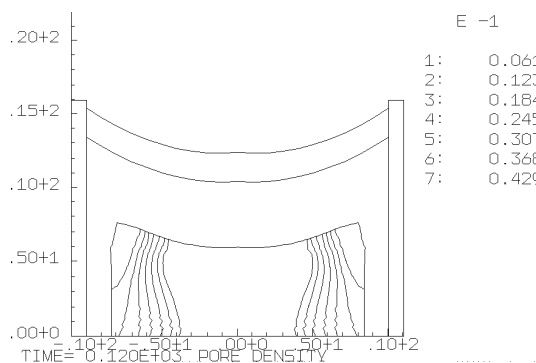


Рис. 7. Пористость после спекания

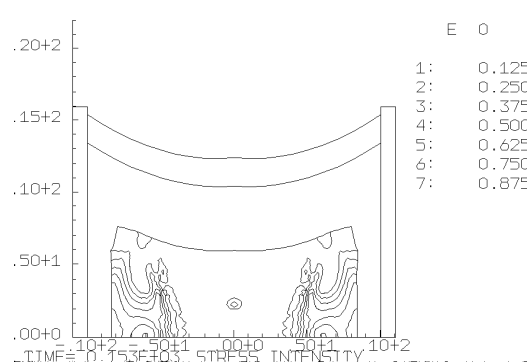


Рис. 8. Интенсивность остаточных напряжений после спекания

Методика была проверена на элементарных тестах поведения репрезентативного объема в условиях однородного деформирования при холодном прессовании и горячем спекании. Сходимость результатов расчета прессования и спекания в условиях неоднородного состояния контролировалась расчетами на вложенных сетках.

Работа выполнена в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Литература

1. Бурого Н.Г., Кукуджанов В.Н. Численное решение упругопластических задач методом конечных элементов. Пакет программ АСТРА. В кн. Вычислительная механика твердого деформируемого тела, Вып. 2, М.: Наука, 1991. С. 78-122.
2. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания. Киев: "Наукова думка", 1972. 151 с.
3. Riedel H. and Sun D.-Z. Simulation of die pressing and sintering of powder metals, hard metals and ceramics, Numer. Meth. in Indust. Proc., Chenot, Wood and Zienkiewicz (Eds.), Balkema, Rotterdam, 1992. P. 883-886.