

СПЕКАНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПОРОШКОВОЙ МАССЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ БЕГУЩЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА

¹Бураго Н.Г., ²Никитин И.С.

¹Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского

²Институт автоматизации проектирования РАН

В данной работе рассматриваются процессы прессования и жидкостного спекания двухкомпонентных порошковых композитных материалов [1]. Материал порошкового композита состоит из смеси легкоплавких частиц, образующих матрицу композита, тугоплавких частиц твердой фазы и воздушных пор. Поры между частицами заполнены газом. Если температура композита достаточна для плавления легкоплавкой составляющей и имеет место смачивание частиц твердой фазы расплавленным материалом матрицы, то поровые капиллярные силы поверхностного натяжения на жидкой поверхности пор суммарно действуют как всестороннее сжимающее напряжение большой интенсивности, сравнимое по порядку величины с модулями упругости материалов композита. Эта, не обусловленная деформацией, нагрузка называется напряжением спекания и обеспечивает постепенное закрытие пор (спекание). Сначала порошок композита насыпается в пресс-форму и уплотняется штампами (проводится процесс прессования). В результате получается пористая твердая деформируемая заготовка будущего изделия, называемая прессовкой (“green body”). Потом прессовка разогревается в печи до температуры, обеспечивающей плавление легкоплавкого материала матрицы. Затем происходит спекание композита (закрытие пор), требующее определенного времени.

Ранее к расчету прессования и спекания была применена модификация теории упругопластического течения [1,2]. В систему уравнений обычной теории добавлено кинетическое уравнение для расчета эволюции пористости под действием упругого давления (процесс прессования) и напряжения спекания (процесс спекания), а свойства упругости и теплопроводности сделаны зависящими от величины пористости.

В данной работе на основе приближенного идеализированного подхода моделируется воздействие подвижного лазерного луча на двухкомпонентный порошковый материал в так называемой фазе «горячего спекания». Проверяется работоспособность разностных схем для численного решения связанной нелинейной системы в переменных температура-пористость и возможность предсказания

возникновения самого режима спекания и влияния на него различных параметров процесса (коэффициентов теплопроводности и теплоемкости, мощности и скорости движения энергетического импульса).

Сформулируем модельную одномерную нестационарную задачу для второй фазы спекания в предположении, что предварительное уплотнение уже произошло (первая фаза завершена).

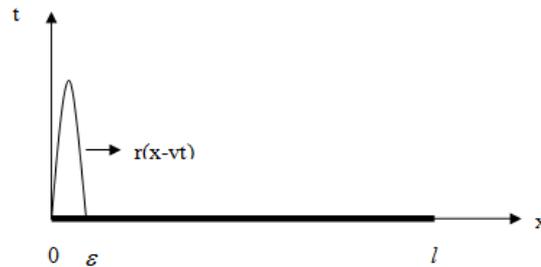


Рис. 1. Энергетический импульс, бегущий по слою уплотненного порошкового материала.

По спекаемому, предварительно уплотненному, стержню длины l со скоростью v бежит энергетический импульс плотностью $r(x-vt)$ и протяженностью ε , Рис. 1. Он разогревает порошковую массу выше температуры плавления легкоплавкой фазы T_m и под действием капиллярных сил происходит схлопывание смоченных пор (по мере прохождения импульса) и спекание с уменьшением пористости.

Упрощенная связанная система уравнений для температуры T и пористости ω , вытекающая из полной системы [1], в этом случае имеет следующий вид:

$$\rho c_v \dot{T} = (kT_x)_x + \rho r_0(x-vt), \quad \dot{\omega} = -H(\omega)[\lambda_\omega p + \alpha \omega H(T - T_m)]$$

$$\rho = \rho_0(1 - \omega), \quad k = k_0(1 - \omega), \quad c_v = c_0(1 - \omega)$$

В уравнении для пористости первое слагаемое отвечает за «механическое» уплотнение под действием напряжения p , а второе слагаемое за «горячее» спекание под действием капиллярных сил при температуре выше температуры плавления легкоплавкой фазы. В дальнейшем предполагаем, что влияние капиллярного давления расплава много больше влияния «холодного» давления ($\alpha \omega \gg \lambda_\omega p$) и имеем упрощенное уравнение для пористости: $\dot{\omega} = -\alpha \omega H(T - T_m)H(\omega)$.

Связанная безразмерная нелинейная система для температуры и пористости:

$$\dot{T} = \frac{\gamma}{(1-\omega)} T_{xx} - \frac{\gamma \omega_x}{(1-\omega)^2} T_x + \frac{R_0(x-vt)}{(1-\omega)}, \quad \dot{\omega} = -\beta \omega H(T - T_m)H(\omega)$$

$$\gamma = \frac{k_0}{\rho_0 c_v l v}, \quad \beta = \alpha l / v$$

Начальные условия: при $t=0$ $T = T_0$, $\omega = \omega_0$.

Граничные условия: при $x=0$ $T = T_0$, при $x=l$ $T = T_0$.

Сформулированная нелинейная задача решалась численно, конечноразностным методом. Также учитывалась необратимая деформация, связанная с изменением пористости спекаемого материала. В качестве примера приведем результаты расчетов при прохождении импульса с амплитудой $R=40$ и шириной $\varepsilon=0.0125$ на расстояние $x=0.5$, скорость $v=0.02$, безразмерные параметры $\gamma=0.05$, $\beta=0.5$, $T_m=3T_0$ (Рис. 2-а,б).

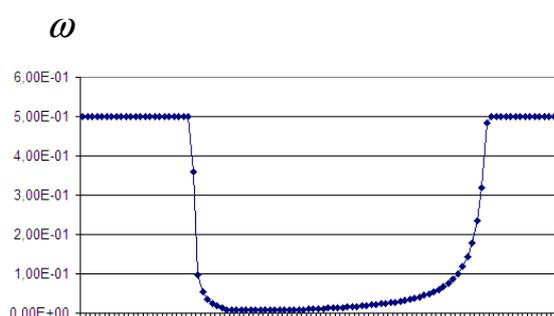


Рис. 2-а. Распределение пористости.

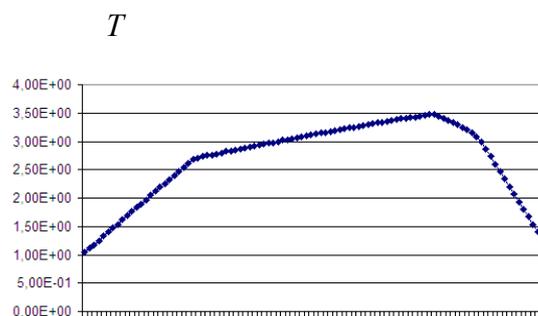


Рис. 2-б. Распределение температуры.

Выводы. Численно решена задача «горячего» спекания (вторая фаза процесса) под действием бегущего энергетического импульса. Определено влияние параметров задачи (амплитуда и скорость импульса, безразмерная теплопроводность, геометрическая линейность/нелинейность, постоянная/переменная теплоемкость) на сам факт спекания порошкового материала и распределение пористости и температуры.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 12-08-00366-а, 12-08-01260-а.

Список литературы

1. Бурого Н.Г., Никитин И.С. Моделирование спекания с помощью теории пластичности. //Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 8.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/883.html>

2. Бурого Н.Г., Глушко А.И., Ковшов А.Н. Термодинамический метод получения определяющих уравнений для моделей сплошных сред // Изв. РАН. МТТ. 2000. N.6. С. 4-15.