УДК 541.427.6

В.Б.Епифанов, В.С.Глущенков,
Г.Е.Кирьяков, В.М.Хорольский

Самарский технический университет

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНВЕРСИРУЕМЫХ ПОРОХОВ И БАЛЛИСТИТНЫХ РАКЕТНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Рассматриваются математические модели измельчения трубчатых порохов в условиях валковых машин и резания баллиститных ракетных твердых топлив.

Mathematical models of tube powder granulating and ballistic rocket fuels cutting by disk saws are presented in the paper.

Переработка энергонасыщенных материалов взрывчатых веществ (ВВ), порохов, баллиститных ракетных твердых топлив (БРТТ) относится к числу пожаровзрывоопасных. Конверсионные технологии, базирующиеся, в основном, на существующих штатных производствах, тем не менее должны учитывать специфические свойства утилизируемых взрывчатых материалов (ВМ). Одной из особенностей таких ВМ является их продолжительное хранение в различных климатических условиях и вероятность изменения физико-химических и физико-механических свойств.

В Самарском техническом университете разработаны математические модели, описывающие процесс измельчения трубчатых порохов на валковых машинах с рифленой рабочей поверхностью, а также резание изделий при разделке БРТТ на фрагменты. Пусть термопластичный материал образован компонентами, соединенными между собой с идеальной адгезией. Первый из компонентов играет роль матрицы, а другие роль отдельных хаотически распределенных в матрице включений эллипсоидальной формы с главными полуосями $a_1^{(s)}$, $a_2^{(s)}$, $a_3^{(s)}$ и различных материалов. Исходные локальные уравнения упругопластического деформирования имеют вид

$$s_{ij} = 2\mu_{m;s}\left(\sqrt{e_{kl}e_{kl}}\right)e_{ij};\ \sigma_{pp} = 3K_{m;s}\varepsilon_{pp}.$$

Здесь m и s – индексы, обозначающие материал матрицы и включений соответственно; $\mu_{m;s}(\sqrt{e_{kl}e_{kl}})$ – нелинейные модули пластичности сдвига; $K_{m;s}$ – объемные модули; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}$ и $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_{kk}$ – девиаторные части тензоров напряжений и деформа-

ций; σ_{ij} и ε_{ij} – тензоры напряжений и малых упругопластических деформаций.

Эти исходные локальные уравнения являются нелинейными. Линеаризуем их, пренебрегая флуктуациями деформаций в пределах объемов матрицы и объемов эллипсоидальных включений s, положив $\Lambda_{m;s}=\sqrt{\langle e_{kl}\rangle_{m;s}\langle e_{kl}\rangle_{m;s}}$. Здесь угловыми скобками обозначены средние значения по соответствующим объемам.

Макроскопический закон упругопластического деформирования хаотически армированного термопластичного материала имеет вид

$$\langle s_{ij}\rangle = 2\mu_m^*\left(\Lambda_m,\Lambda_1,...,\Lambda_n\right)\langle e_{ij}\rangle;$$
$$\langle \sigma_{pp}\rangle = 3K^*\left(\Lambda_m,\Lambda_1,...,\Lambda_n\right)\langle \varepsilon_{pp}\rangle. \qquad (1)$$

Эффективные тензоры пластичности

$$\mu^* = \mu_m + \frac{\sum_{s=1}^{n}[\mu_s]c_s\alpha_s}{c_m+\sum_{s=1}^{n}c_s\alpha_s};$$
$$K^* = K_m + \frac{\sum_{s=1}^{n}[K_s]c_s\gamma_s}{c_m+\sum_{s=1}^{n}c_s\gamma_s}. \qquad (2)$$

Здесь $[\mu_s]=\mu_s(\Lambda_s)-\mu_m(\Lambda_m)$ и $[K_s]=K_s-K_m$ – скачки материальных параметров при переходе через границы фаз; $c_{m,s}$ – концентрации компонентов; α_s и γ_s – параметры, определяемые с помощью компонентов тензора Эшелби.

При вырождении эллипсоидов в сферы ($a_1^{(s)}=a_2^{(s)}=a_3^{(s)}$) соотношения (2) правильно преобразуются в формулы

$$\mu^* = \mu_m\frac{(1-\alpha)\xi}{1-\alpha\xi};\ \xi=\sum_{s=1}^{n}\frac{c_s\mu_s(\Lambda_s)}{\mu_m+\alpha[\mu_s(\Lambda_s)]};$$
$$K^* = K_m\frac{(1-\gamma)\eta}{1-\gamma\eta};\ \eta=\sum_{s=1}^{n}\frac{c_sK_s}{K_m+\gamma[K_s]}. \qquad (4)$$

Здесь

$$\alpha=\frac{2}{15}\frac{4-5\nu_m}{1-\nu_m};\ \gamma=\frac{1}{3}\frac{1+\nu_m}{1-\nu_m};\ \nu=\frac{3K_m-2\mu_m}{6K_m+2\mu_m};$$

ν_m – коэффициент Пуассона.

В случае, когда все модули сдвига материалов компонентов $\mu_{m,s}$ являются константами, формулы (1) и (3) совпадают с известными результатами сингулярного приближения в теории линейной упругости микронеоднородных сред и показывают хорошее соответствие с экспериментальными данными для упругих и жестких включений, а также и для пор.

Уравнения (1) можно применять для расчета упругопластических свойств пористых сред при различных способах нагружения. Участки диаграммы чистого сдвига материалов компонентов аппроксимируются экспоненциальной зависимостью

$$\tau = k\left[1-\exp\left(-\frac{2G\Lambda}{k}\right)\right], \qquad (4)$$

где G – модуль сдвига; k – предельное значение сдвиговых напряжений (предел текучести); $\tau^2=s_{ij}s_{ij}$; $\Lambda^2=e_{ij}e_{ij}$.

Функции модулей пластичности для соотношений (4) имеют вид

$$\mu_s(\Lambda_s)=\frac{k_s\left[1-\exp\left(-2G\Lambda_sk^{-1}\right)\right]}{2\Lambda_s}. \qquad (5)$$

Применим уравнения (1), (3), (5) для расчета упругопластических свойств пористой среды при прессовании в осесимметричной пресс-форме. Модель пористого материала получается, если для одного (n-го) компонента положить $\mu_n=K_n\approx 0$, $\omega=c_n$, где ω – пористость.

Для двухкомпонентного пористого материала эффективные модули

$$\mu^*=\mu_m\frac{c_m(1-\alpha)}{1-c_m\alpha},\quad K^*=K_m\frac{c_m(1-\gamma)}{1-c_m\gamma}.$$

Связь осевого давления $P=\langle\sigma_{ij}\rangle$ и пористости $\omega=c_2$ получается из (1), если в них положить $i=j=1$. Поскольку макродеформации среды в осесимметричной пресс-форме

связаны с объемным содержанием пор соотношением $\langle\varepsilon_{11}\rangle = \ln\frac{1-\omega_0}{1-\omega}$, при $\langle\varepsilon_{22}\rangle = \langle\varepsilon_{33}\rangle = 0$ получим уравнение прессования

$$P = \left(K^* + \frac{4}{3}\mu^*\right)\ln\frac{1-\omega_0}{1-\omega}, \qquad (6)$$

где ω_0 – начальная пористость материала.

Известно, что механический процесс разделки твердых топлив сопровождается тепловыделением, которое является решающим ограничивающим фактором обработки. Поэтому крайне необходимо исследование температурного режима в зависимости от параметров обработки, в первую очередь от скорости резания. Иногда достаточно ограничиться определением максимальной температуры и ее связи с режимами обработки. Теплообмен необходимо рассматривать в системе движущихся тел: инструмент, топливо, охлаждающая жидкость.

Предлагаемая схема заключается в следующем. Общую температуру T для всех тел можно выразить через тепловые потоки q_i в теле:

$$T = q_i\gamma_i \quad i = 1, 2, 3, \qquad (7)$$

где γ_i – тепловые потенциалы, получаемые согласно известным положениям теории теплопроводности.

Уравнение теплового баланса в зоне обработки имеет вид

$$Q = \sum q_i S_i, \qquad (8)$$

где Q – общая мощность тепловыделения; S_i – площадь контактов.

Решая систему (7)-(8), получим

$$T = Q\left[\frac{S_i}{\gamma_i}\right]^{-1}; \quad q_i = \frac{S_i}{\gamma_i}T,$$

где S_i/γ_i играет роль термических сопротивлений каждого тела.

Приведенное решение носит структурный характер и позволяет рассматривать различные варианты обработки топлив. Для стационарного процесса формулы для расчета максимальной температуры достаточно просты. Для нестационарного процесса следует установить время выхода на стационарный режим.