

УДК 531.22+536.413+544.032.2

## ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДОФАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТОНКОЙ ПЛАСТИНЕ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ И ЧИСТОГО СДВИГА

Н.К. Евстигнеев\*, А.Г. Князева

Томский политехнический университет

\*Томский государственный университет

E-mail: evstigneev.nk@rambler.ru; anna@ispms.tsc.ru

Предложена математическая модель распространения твердофазной химической реакции в пластине в условиях механического нагружения в виде одноосного растяжения и чистого сдвига. Задача решена в двумерной постановке. Проведено параметрическое исследование модели. Проанализирована эволюция полей напряжений и деформаций. Проиллюстрировано влияние связанности полей температуры, концентраций и напряжений на распространение превращения.

**Ключевые слова:**

Напряжения, деформации, растяжение, сдвиг, твердофазная химическая реакция.

**Key words:**

Stresses, strains, shear, solid-phase chemical reaction.

Деформированные атомные связи и их реакционная способность давно находятся в поле зрения теоретиков и экспериментаторов. Редкая химическая реакция не сопровождается изменением объема и возникновением (или релаксацией) внутренних напряжений. Причины этого – неравномерность нагрева вещества, неоднородность его структуры, различие удельных объемов реагентов или продуктов или несоответствие их структур и т. д. Так, если источник инициирования превращения тепловой, то часть тепла тратится на деформирование, что приводит к затягиванию темпа нагрева, и, следовательно, к уменьшению скорости реагирования вещества. Если внешний источник – механический импульс, то релаксация напряжений, кроме разрушения вещества и генерирования дефектов структуры, сопровождается выделением тепла [1]. Возникающие в твердых телах механические напряжения разной физической природы могут влиять на скорость химических реакций как прямо, так и косвенно [2]. Это используется, например, для синтеза материалов в условиях нагружения [3, 4]. Воздействие напряжений на константу скорости реакции разрыва упругонапряженных связей  $k$  описывается уравнением Эйринга–Козмана [5]

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a - \sigma V_a}{RT}\right),$$

где  $k_0$  и  $E_a$  – предэкспоненциальный множитель и энергия активации термического распада;  $\sigma V_a$  – работа, производимая упругими напряжениями в акте реакции ( $\sigma$  – напряжение,  $V_a$  – активационный объем);  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура. Запись этого уравнения подразумевает, что действие напряжений облегчает переход через энергетический барьер, но не влияет на его высоту. Это приближение, по-видимому, справедливо при деформации связей в упругой области, а под  $\sigma$  понимаются локальные напряжения.

В настоящей работе представлена и исследована модель распространения твердофазной химической реакции в условиях механического нагружения с учетом изменения скорости реакции под действием напряжений. Исследовано два вида нагружения: одноосное растяжение и чистый сдвиг. При записи уравнения кинетики реакции, в соответствии с представлениями [5, 6], учтено, что химическую реакцию можно инициировать двумя основными способами: изменить внутреннюю энергию (температуру) или совершить работу. Таким образом, приходим [7] к функции химического тепловыделения вида

$$\varphi(Y, T) = k_0(1 - Y) \exp\left(-\frac{E_a - k_\sigma \Pi}{RT}\right),$$

где  $Y$  – степень превращения;  $k_\sigma$  – коэффициент чувствительности скорости реакции к работе напряжений;  $\Pi = -\sum_{i=x,y,z} \sigma_{ii} \varepsilon_{ii}$  – работа напряжений;

$\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора деформаций.

Если тензор напряжений шаровой, то

$$\Pi = -[\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz}] = -\sigma \varepsilon_{kk} = \frac{P}{3} \varepsilon_{kk}.$$

В этом случае коэффициент  $k_\sigma$  может быть непосредственно связан с активационным объемом:  $k_\sigma = V_a = \Delta \gamma_m$ , где  $\gamma_m$  – локальный мольный объем.



Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи

На рис. 1 схематически изображена иллюстрация к постановке задачи. Предполагается, что образец имеет форму неподвижной тонкой пластины из реакционноспособного вещества (прессовка). Длина пластины –  $L_x$ , ширина –  $L_y$ , высота –  $L_z$ ,  $L_z \ll L_x$ ,  $L_z \ll L_y$ . Рассматриваются два варианта нагружения пластины: одноосное растяжение и чистый сдвиг. В первом случае к торцам пластины при  $x=0$  и  $x=L_x$  приложена распределенная нагрузка величиной  $P$ , направление которой совпадает с осью  $Ox$ . Во втором случае помимо описанной нагрузки величиной  $P_1$  к двум другим торцам приложена нагрузка  $P_2$ , направление действия которой совпадает с осью  $Oy$ . Результирующая этих усилий  $P$  направлена вдоль диагональной линии пластины. В задаче теории упругости это возможно, когда величины  $P_1$  и  $P_2$  соотносятся между собой так, что  $P_1 = P \cdot \cos \alpha$ ,  $P_2 = P \cdot \sin \alpha$ ,  $\operatorname{tg} \alpha = L_x / L_y$ .

В направлении оси  $Ox$  в пластине протекает экзотермическая химическая реакция, которая может быть описана простой суммарной схемой вида  $A \rightarrow B$ . Считаем, что температура плавления не достигается, и вся реакция проходит в твердой фазе. Это требование является условием некоторых технологий синтеза материалов. Поскольку скорость распространения механических возмущений много больше скорости распространения твердофазной химической реакции, силами инерции в первом приближении пренебрегаем. Теплообмен с окружающей средой не учитываем. Механические модули материала считаем постоянными в течение всего процесса.

В силу малости толщины пластины  $L_z$  по сравнению с  $L_x$  и  $L_y$ , перейдем к приближению обобщенного плоского напряженного состояния [8].

В этом случае система уравнений равновесия в напряжениях примет вид:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Из условий совместности деформаций останется только одно:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}. \quad (3)$$

Связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций выражается обобщенными соотношениями Дюамеля–Неймана [9]

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy}) + \frac{\omega}{3}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx}) + \frac{\omega}{3}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_{xy}. \quad (6)$$

где  $\omega = 3[\alpha_T(T - T_0) + (\alpha_p - \alpha_r)Y]$  – функция объемного расширения;  $\alpha_T$  – коэффициент теплового расширения;  $\alpha_p$  и  $\alpha_r$  – коэффициенты структурного расширения продукта реакции и реагента соответственно;  $\alpha_p - \alpha_r$  – коэффициент, учитывающий несоответствие между объемами конечной и начальной фаз;  $E$  – модуль упругости.

Дифференцируя (1) и (2) по  $x$  и  $y$ , а также подставляя их вместе с (4)–(6) в (3), получаем систему уравнений для определения ненулевых компонент тензора напряжений:

$$\Delta \sigma_{kk} = -\frac{E}{3} \Delta \omega, \quad (7)$$

$$\Delta \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \sigma_{kk}}{\partial x^2}, \quad (8)$$

$$\Delta \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 \sigma_{kk}}{\partial x \partial y}, \quad (9)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа, а  $\sigma_{kk} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy}$ .

Переходя к безразмерным переменным

$$s_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_*}, \quad e_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_*}, \quad \xi = \frac{x}{x_*}, \quad \eta = \frac{y}{y_*}, \quad \bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_*},$$

где

$$\sigma_* = 3K\alpha_T(T_* - T_0), \quad \varepsilon_* = \omega_* = 3\alpha_T(T_* - T_0),$$

$$x_* = y_* = \sqrt{\frac{\lambda_T t_*}{c\rho}}, \quad t_* = \frac{c\rho RT_*^2}{E_a Q k_0} \exp\left(\frac{E_a}{RT_*}\right),$$

$$T_* = T_0 + \frac{Q}{c\rho},$$

$K$  – модуль всестороннего сжатия;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность (в общем случае все физические свойства зависят от пористости);  $Q$  – тепловой эффект химической реакции, получим систему уравнений

$$\Delta s_{kk} = (2\nu - 1)\Delta \bar{\omega}, \quad (10)$$

$$\Delta s_{yy} = \frac{\partial^2 s_{kk}}{\partial \xi^2}, \quad (11)$$

$$\Delta s_{xy} = -\frac{\partial^2 s_{kk}}{\partial \xi \partial \eta}. \quad (12)$$

Граничные условия в случае одноосного растяжения запишутся в виде

$$\xi = 0, \quad \xi = L_\xi : s_{kk} = \bar{P}, \quad s_{yy} = 0, \quad s_{xy} = 0, \quad (13)$$

$$\eta = 0, \quad \eta = L_\eta : s_{kk} = 0, \quad s_{yy} = 0, \quad s_{xy} = 0,$$

а в случае чистого сдвига приобретут вид

$$\xi = 0, \quad \xi = L_\xi : s_{kk} = \bar{P}_1, \quad s_{yy} = 0, \quad s_{xy} = 0, \quad (14)$$

$$\eta = 0, \quad \eta = L_\eta : s_{kk} = \bar{P}_2, \quad s_{yy} = \bar{P}_2, \quad s_{xy} = 0.$$

Здесь  $\bar{P} = \frac{P}{3K\alpha_T(T_* - T_0)}$  – безразмерная величина внешней нагрузки,  $\bar{P}_y/\bar{P}_x = L_x/L_y$ . Равнодействующая двух нагрузок  $\bar{P} = \sqrt{\bar{P}_1^2 + \bar{P}_2^2}$ .

Задача о распространении реакции в безразмерных переменных

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_* - T_0}, \tau = \frac{t}{t_*}$$

принимает вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} + \frac{\partial Y}{\partial \tau} - \delta(\theta + \sigma_T) \frac{\partial e_{kk}}{\partial \tau}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \tau} = \frac{1}{\theta_0} (1 - Y) \exp \left( \frac{(\theta - 1 - \delta A(\sigma_T + 1)) \sum_i s_{ii} e_{ii}}{\beta(\theta + \sigma_T)} \right), \quad (16)$$

$$\bar{\omega} = \theta + g \cdot Y. \quad (17)$$

Начальные и граничные условия запишем следующим образом:

$$\tau = 0: \theta = 0, Y = 0, \quad (18)$$

$$\xi = 0: \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \bar{q}_0, \xi = L_\xi: \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = 0, \quad (19)$$

$$\eta = 0: \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0, \eta = L_\eta: \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0. \quad (20)$$

В задаче присутствуют безразмерные параметры:

$$\delta = \frac{K\alpha_T\omega_*}{c\rho}, \sigma_T = \frac{T_0}{T_* - T_0}, \theta_0 = \frac{1}{\beta(\theta + \sigma_T)},$$

$$A = \frac{k_\sigma Q}{E}, \beta = \frac{RT_*}{E}, g = \frac{\alpha_p - \alpha_r}{\alpha_T(T_* - T_0)},$$

$$\bar{q}_0 = \frac{q_0 x_*}{\lambda_T(T_* - T_0)}, L_\xi = \frac{L_x}{x_*}, L_\eta = \frac{L_y}{y_*},$$

имеющие четкий физический смысл:  $\delta$  – коэффициент связанности процессов деформирования и теплопереноса;  $\sigma_T$  – отношение начальной температуры к величине теплового разогрева;  $\theta_0$  – число Зельдовича;  $A$  – коэффициент чувствительности химической реакции к работе напряжений;  $\beta$  – величина, пропорциональная  $1/E$ ;  $g$  – относительное изменение объема в ходе реакции (отношение концентрации деформации к термической);  $q_0$  – плотность теплового потока;  $\bar{q}_0$  – интенсивность внешнего теплового потока;  $L_\xi$  – безразмерная длина пластины;  $L_\eta$  – безразмерная ширина пластины. Индекс «0» относится к начальным условиям.

Задача решена численно. Уравнения (10)–(12) решались методом последовательной верхней релаксации [10]. Для решения уравнения теплопроводности (15) использована схема переменных на-

правлений [11]. Для уравнения (16) использована явно- неявная разностная схема. По переменной  $Y$  схема неявная, а значения температуры и компонент тензоров напряжений и деформаций вычисляются предварительно и считаются «замороженными».

Размеры пластины выбраны равными  $10 \times 10$  см. Оценки определяющих параметров системы получены на основании справочных данных для системы Ti+Ni [12]. При изменении  $T_*$  от 900 до 1200 °C получаем  $0,3 < \sigma_T < 0,23$ ,  $0,09 < \beta < 0,12$ . Значение коэффициента чувствительности скорости химической реакции зависит от типа вещества и должно определяться экспериментально. В расчетах зафиксировано:  $\sigma_T = 0,25$ ,  $\beta = 0,1$ ,  $L_\xi = 15$ ,  $L_\eta = 15$ ,  $\nu = 0,33$ . Параметры  $A$ ,  $\delta$ ,  $g$ ,  $\bar{P}$  менялись в широких пределах:  $A = 0 \dots 20$ ,  $\delta = 0 \dots 0,06$ ,  $g = -1,5 \dots 1,5$ ,  $\bar{P} = 0 \dots 2$ .

Программа была протестирована:

- 1) Выполнен расчет для следующего предельного случая: инертная задача без нагружения и без химической реакции,  $L_\xi \rightarrow \infty$ . В этом случае уравнение (1) имеет точное аналитическое решение [13]

$$\theta(\xi, \eta, \tau) = 2q\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\tau}\right) - q\xi \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau}}\right),$$

которое воспроизводилось численно с точностью не хуже 1 %.

- 2) Температура не изменяется, химических реакций нет. В условиях одноосного нагружения максимальные значения напряжений ( $s_{kk} = \bar{P}$ ) находятся на нагружаемых поверхностях и убывают вглубь пластины, поле напряжений симметрично относительно прямой  $\eta = L_\eta/2$ . В условиях чистого сдвига инвариант тензора напряжений принимает постоянное значение во всей области, равное  $\bar{P}$ .

При численном исследовании модели определялись и анализировались распределения температуры, степени превращения, компонент тензоров напряжений и деформаций в различные моменты времени, анализировалась эволюция температуры поверхности, средняя степень превращения и скорость распространения химической реакции.

Максимальная температура в течение всего процесса достигалась на поверхности пластины при  $\xi = 0$ . Увеличение коэффициента чувствительности химической реакции приводит к незначительному замедлению ее роста в начальной стадии процесса. Стоит отметить, что в случае растяжения максимум температуры с течением времени устанавливается на оси симметрии пластины при  $\eta = L_\eta/2$ , а при чистом сдвиге точка с максимальной температурой мигрирует вдоль линии  $\xi = 0$  в сторону увеличения значений  $\eta$  в течение всего превращения. Это обусловлено влиянием работы напряжений и тем фактом, что при сдвиге отсутствует ось симметрии.

Введем в рассмотрение среднюю степень пре-

$$\langle Y \rangle = \frac{1}{L_\xi L_\eta} \int_0^{L_\xi} \int_0^{L_\eta} Y d\xi d\eta.$$

Ее эволюция показана на рис. 2. Для практических исследований важную роль играет такая характеристика, как время полупревращения  $\tau_{0,5}$  [14], которое легко определить с помощью кривых  $\langle Y \rangle(\tau)$ , как показано на рисунке. Видно, что коэффициент чувствительности скорости реакции к работе напряжений  $A$  существенным образом влияет на время полупревращения.

Обнаружено, что  $\tau_{0,5}$  по-разному изменяется при изменении параметров модели. С увеличением параметра  $g$  время полупревращения линейно возрастает. При увеличении интенсивности внешней нагрузки обнаруживается нелинейный рост времени полупревращения.

Рис. 3 показывает, какие существенные коррективы в динамику процесса вносит учет связанности. Сравнивая кривые 1 и 3, видим, что время полупревращения изменяется более чем в 2 раза при изменении  $\delta$  от 0 до 0,06.

В целом из анализа рис. 2 и 3 можно сделать вывод о том, что по сравнению с одноосным растяжением нагрузка в виде чистого сдвига приведет к более быстрому протеканию химической реакции, что и обнаруживается во многих экспериментальных исследованиях. Еще большего эффекта следует ожидать в моделях, учитывающих динамические явления.

На рис. 4 показана эволюция инвариантов тензоров напряжений и деформаций.

Искривление изолиний напряжений на рис. 4, б, в, дает информацию о положении фронта реакции:  $\xi \approx 2$  при  $\tau = 15$  и  $\xi \approx 5$  при  $\tau = 30$ , что подтверждается сравнением с полем концентраций (рис. 5, д, е). По рис. 4, г-е, можно проследить за ростом деформаций в пластине. Заметим, что деформации, вызванные химической реакцией, достигают больших значений и существенно превышают деформации, вызванные внешней нагрузкой. При отсутствии химической реакции максимальное значение инварианта тензора деформации  $\varepsilon_{kk} = 0,45$ , после протекания реакции в прогретой области  $\varepsilon_{kk} = 4,49$ .

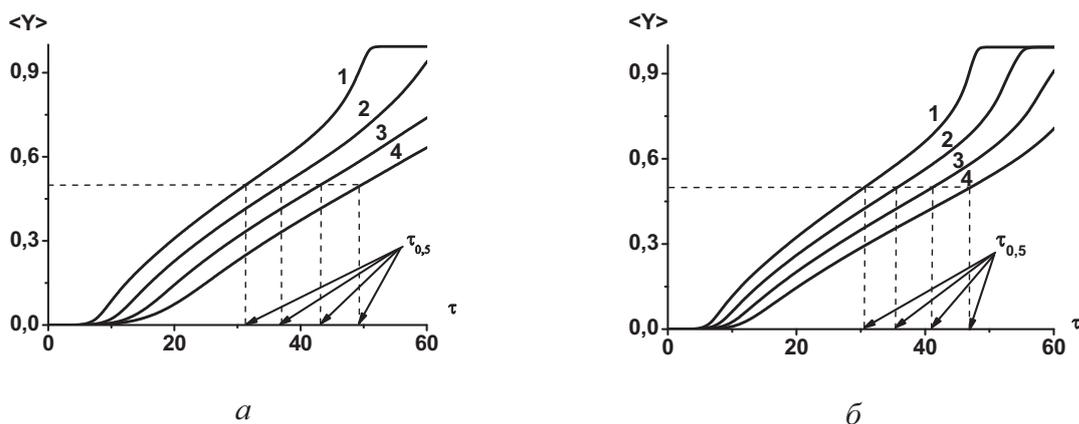


Рис. 2. Изменение со временем средней степени превращения в случае одноосного растяжения (а) и чистого сдвига (б).  $\sigma_\tau = 0,25$ ;  $\beta = 0,1$ ;  $L_\xi = 15$ ;  $L_\eta = 15$ ;  $g = 0,5$ ;  $P = 1$ ;  $\bar{q}_0 = 0,5$ ;  $\delta = 0,03$ . 1)  $A = 5$ ; 2)  $A = 10$ ; 3)  $A = 15$ ; 4)  $A = 20$

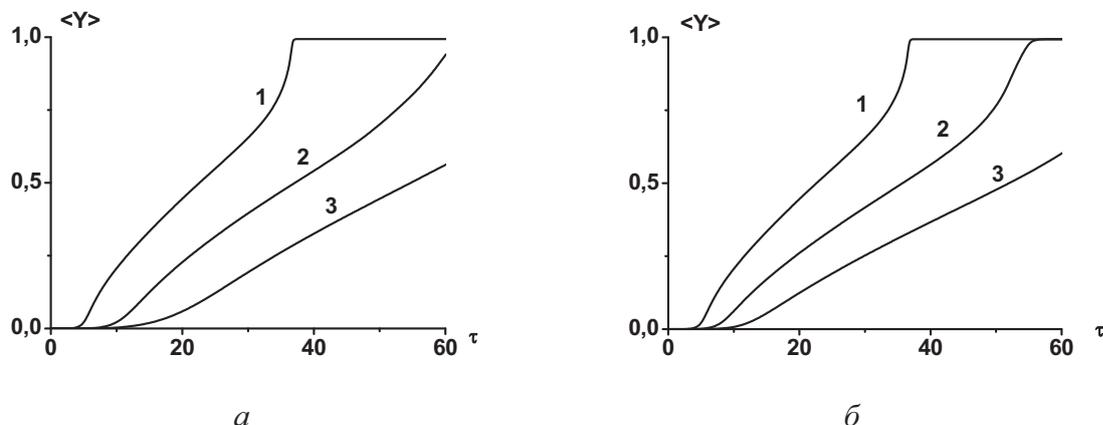
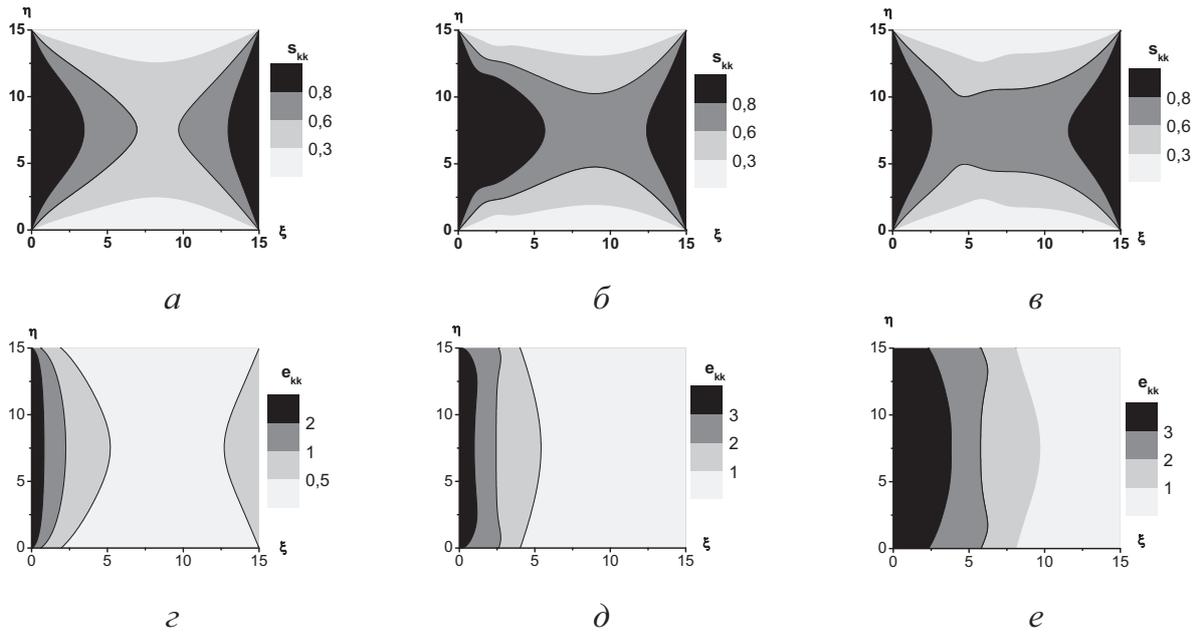
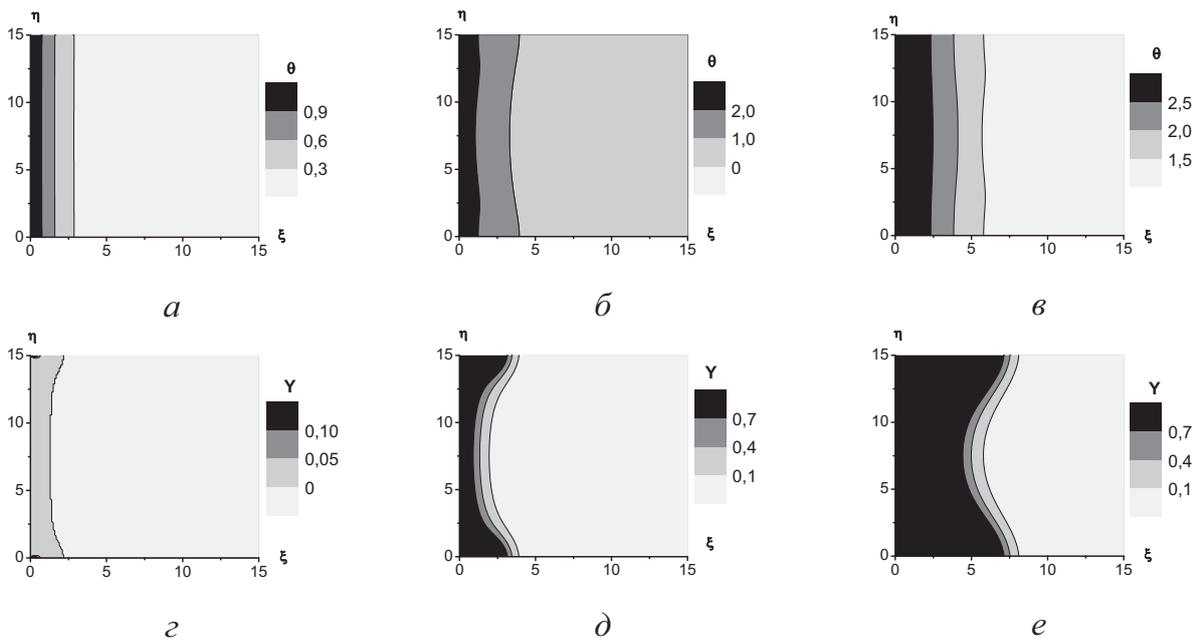


Рис. 3. Влияние коэффициента связанности на химическое превращение в случае одноосного растяжения (а) и чистого сдвига (б).  $\sigma_\tau = 0,25$ ;  $\beta = 0,1$ ;  $L_\xi = 15$ ;  $L_\eta = 15$ ;  $g = 0,5$ ;  $P = 1$ ;  $\bar{q}_0 = 0,5$ ;  $A = 10$ . 1)  $\delta = 0$ ; 2)  $\delta = 0,03$ ; 3)  $\delta = 0,06$



**Рис. 4.** Динамика изменения инвариантов тензора напряжений (а-в) и деформаций (г-е) в случае одноосного растяжения.  $\tau=5$  (а, г);  $\tau=15$  (б, д);  $\tau=30$  (в, е);  $\sigma_r=0,25$ ;  $\beta=0,1$ ;  $L_\xi=15$ ;  $L_\eta=15$ ;  $g=0,5$ ;  $\bar{P}=1$ ;  $\bar{q}_0=0,5$ ;  $A=10$ ;  $\delta=0,03$



**Рис. 5.** Эволюция полей температуры (а-в) и степени превращения (г-е) в случае одноосного растяжения.  $\tau=5$  (а, г);  $\tau=15$  (б, д);  $\tau=30$  (в, е);  $\sigma_r=0,25$ ;  $\beta=0,1$ ;  $L_\xi=15$ ;  $L_\eta=15$ ;  $g=0,5$ ;  $\bar{P}=1$ ;  $\bar{q}_0=0,5$ ;  $A=10$ ;  $\delta=0,03$

Различные условия нагружения приводят к тому, что фронт реакции распространяется не в виде полосы, параллельной оси  $\eta$ , а изгибается соответствующим условиям нагружения образом. Так, в случае одноосного растяжения изолинии  $Y(\xi, \eta)$  и  $\theta(\xi, \eta)$  симметричны относительно прямой  $\eta=L_\eta/2$  (рис. 5). При более сложном нагружении в виде сдвига симметрия нарушается. Аналогичная картина наблюдается для всех компонент тензоров напряжений и деформаций.

### Выводы

Предложена двумерная связанная математическая модель, описывающая влияние различных условий нагружения на твердофазное химическое превращение в пластине. Модель учитывает взаимовлияние механических напряжений и химического превращения (тепловыделения в реакции и различия удельных объемов реагента и продукта). Разработан алгоритм численного исследования мо-

дели, проведено ее параметрическое исследование. Выяснено, что возникающие в ходе превращения напряжения и деформации играют существенную

роль в динамике процесса. Показано влияние условий нагружения на протекание химического превращения в пластине.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Известия АН СССР. Сер. хим. – 1990. – № 10. – С. 2228–2245.
2. Болдырев В.В., Чупахин А.П., Сидельников А.А. Влияние возникающих при твердофазных превращениях механических напряжений на их кинетику. I. Общий подход // Известия СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1985. – Т. 17. – № 6. – С. 31–38.
3. Подлесов В.В., Радугин А.В., Столин А.М., Мержанов А.Г. Технологические основы СВС-экструзии // Инженерно-физический журнал. – 1992. – Т. 63. – № 5. – С. 525–537.
4. Овчаренко В.Е., Лапшин О.В., Боянгин Е.Н., Рамазанов И.С., Чудинов В.А. Высокотемпературный синтез интерметаллического соединения  $Ni_3Al$  под давлением // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2007. – № 4. – С. 63–69.
5. Бутягин П.Ю. Проблемы и перспективы механохимии // Успехи химии. – 1994. – Т. 63. – № 12. – С. 1031–1043.
6. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. – М.: Высшая школа, 1984. – 463 с.
7. Князева А.Г. Зажигание конденсированного вещества горячей пластиной с учетом термонапряжений // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28. – № 1. – С. 13–18.
8. Теребушко О.И. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Наука, 1984. – 319 с.
9. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1964. – 517 с.
10. Роуч П.Дж. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
11. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971. – 552 с.
12. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
13. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
14. Браун М., Доллимор Д., Галвей А. Реакции твердых тел. – М.: Мир, 1983. – 359 с.

Поступила 20.10.2009 г.

УДК 621.3.048.1

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ СТАРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖУРКОВА–ДМИТРЕВСКОГО

Б.С. Бояршинов, Г.И. Хожайнова\*

Московский государственный гуманитарный университет

\*Московский государственный открытый университет

E-mail: boyarshinov\_b\_s@mail.ru

*Изложены результаты экспериментов по исследованию сроков службы эпоксидной изоляции при различных температурах и после ионизирующего облучения. Экспериментальные данные интерпретированы с позиций термофлуктуационной теории. С помощью метода максимума правдоподобия получены параметры модели разрушения изоляции, в том числе: объём и концентрация неоднородностей, период колебаний атомов в углеродной цепочке. Использование математической обработки в предположении справедливости термофлуктуационной теории Журкова–Дмитревского позволило приблизить экспериментальные вариационные ряды с точностью не хуже 4...10 %.*

#### Ключевые слова:

Термофлуктуационная теория, теория старения, динамика старения, модель разрушения изоляции, эпоксидная изоляция.

#### Key words:

Thermo-fluctuation theory, ageing theory, dynamics of ageing, destruction of isolation model, epoxy isolation.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке термофлуктуационной теории Журкова–Дмитревского [1, 2] на примере разрушения под нагрузкой образцов эпоксидной изоляции.

В рамках настоящей работы проведены 27 серий экспериментов с выборками образцов эпоксидной изоляции объёмом от 31 до 89 образцов. Объём нагруженной части образца составлял от 50 до 220 мм<sup>3</sup> и в пределах серии поддерживался постоянным. Для исключения появления в эпоксид-

ной изоляции газовых включений перед отверждением эпоксидная изоляция выдерживалась 20 мин. при давлении 100 Па и температуре 353 К. Подвергнутые испытаниям образцы были выполнены из компаунда на основе эпоксидной диановой смолы ЭД-16. Электрические испытания проводились на образцах, имеющих форму блоков с залитыми электродами. Система электродов цилиндр-плоскость. Электроды были покрыты демпфирующим слоем из полупроводящей резины. Напряжённость