

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОЦЕССОВ СВС-ФОРМОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Д. С. Дворецкий¹, С. И. Дворецкий¹, Л. С. Стельмах², А. М. Столин²

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1), dvoretsky@tambov.ru; ФГБУН «Институт структурной
макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН)», г. Черноголовка (2)*

Ключевые слова: аппаратурно-технологическое оформление; математическое моделирование; моделирование; неопределенность; оптимизация; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; СВС-формование; системный анализ; твердосплавные материалы; температурное поле; термоупругие напряжения.

Аннотация: Представлена математическая модель процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) твердосплавных материалов и их формования, с помощью которой разработана оригинальная методика экономичного расчета аппаратурно-технологического оформления для осуществления данных процессов, позволяющего снизить расход конструкционного материала на изготовление технологической оснастки в среднем на 25 %. Сформулирована и решена одноэтапная задача стохастической оптимизации аппаратурно-технологического оформления процесса СВС-формования твердосплавных материалов марок СТИМ-2А, СТИМ-2/30Н в условиях интервальной неопределенности скорости и температуры горения шихты. Спроектирована конструкция пресс-формы с минимальным расходом конструкционного материала, обеспечивающая производство качественных изделий из твердосплавных материалов марок СТИМ-2А, СТИМ-2/30Н независимо от случайного изменения неопределенных параметров процесса СВС-формования (скорости и температуры горения) в заданных пределах.

Введение

В настоящее время в химической и металлургической промышленности существует ряд производств, для которых характерны процессы, протекающие при наличии высоких температур и динамических нагрузок. Проектирование оборудования для таких процессов требует комплексного моделирования как самого рабочего процесса, так и полей температур и термоупругих напряжений, возникающих в элементах оборудования. Так, например, получение твердосплавных материалов методом формования горячих продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) протекает за короткий промежуток времени $t = 0,5 \dots 1,5$ с при высоких значениях температуры $T = 2000 \dots 3000$ °С и давле-

ния $P = 100$ МПа. При этом в цилиндрической стенке пресс-формы развиваются термоупругие напряжения, обусловленные высоким градиентом температуры и неравномерной тепловой нагрузкой.

В работе [1] представлено критическое обсуждение существующих традиционных методов прочностного расчета цилиндрических обечаек (корпусов, пресс-форм и т.п.), нагруженных внутренними силовыми и температурными напряжениями. Общий недостаток этих расчетов состоит в том, что они не отражают особенностей рабочего процесса, протекающего внутри оборудования, не учитывают их существенную нестационарность, неизотермичность, а также качественно различный уровень термической градиентности по толщине стенки оборудования. Применение традиционных методик прочностного расчета приводит в этих случаях к неоправданному увеличению веса оборудования и соответственно расходу конструкционного материала.

Ниже представлены результаты теоретических и прикладных исследований системных связей и закономерностей функционирования процесса СВС-формования горячих продуктов твердосплавных материалов методом математического моделирования, а также выбора аппаратурно-технологического оформления для осуществления этого процесса с минимальными удельными расходами конструкционного материала технологической оснастки.

Технологический расчет пресс-формы для СВС-формования твердосплавных материалов

Схема технологической установки (рис. 1) включает в себя сжигаемый шихтовый брикет 1, цилиндрическую пресс-форму 2, плоскую крышку 3, поддон 4 и стол 5. В случае использования теплоизолятора в схему включается тонкая оболочка теплоизолирующего материала (на рис. 1 не показана). Тепло от горячего обрабатываемого материала передается элементам оснастки за счет плотного контакта материала и элементов. От пресс-формы 2 и крышки 3 тепло отводится за счет конвективного теплообмена с окружающей средой, через поддон 4 тепло передается массивному металлическому столу, на котором установлена пресс-форма.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез твердосплавных материалов включает стадии горения, задержки приложения давления и формования. На стадиях горения и задержки в ходе протекания химической реакции образуется твердосплавный материал с заданными характеристиками. При этом возникает необходимость отвода примесных газов, что и обуславливает задержку приложения давления к обрабатываемому материалу. Время задержки – интервал времени от начала подачи теплового импульса до начала приложения давления.

На стадии формования происходит уплотнение продуктов экзотермической химической реакции за счет уменьшения объемов воздушных включений в материале и закрытия макропор. Наличие этой стадии обусловлено свойством сжимаемости шихты (порошкового материала). Далее осуществляется отверждение материала за счет охлаждения. При этом важно не допустить высоких термических напряжений в образце и элементах технологической оснастки.

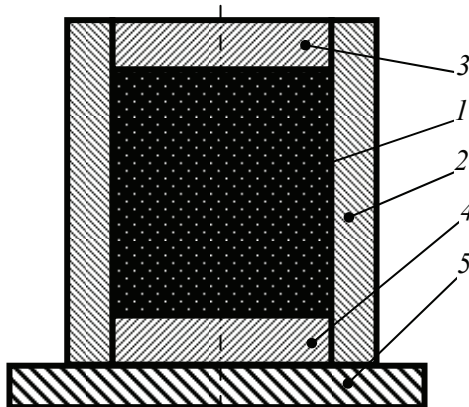


Рис. 1. Элементы технологической оснастки процессов СВС-формования

На стадиях горения-задержки необходимо учитывать наличие подвижной границы – фронта горения, перемещающегося по объему материала. Для стадии формирования характерно изменение высоты образца и зависимость теплофизических параметров материала от его плотности.

Во время формирования материала в матрице он должен обладать способностью к пластическому деформированию. Поведение материала при деформировании определяется комплексом реологических свойств, и, прежде всего, вязкостью и ее зависимостью от скорости сдвига. В рамках принятой в работе тепловой модели, влияние реологических свойств на процесс отражено опосредованно – через температуру живучести. При некоторой условности этой характеристики, можно считать, что выше этой температуры материал проявляет способность к течению, ниже – затвердевает. В тепловой модели приняты эффективные характеристики процесса горения образца: скорость U_{Γ} и температура T_{Γ} горения, определяемые экспериментально.

К режимным (управляющим) переменным z технологического процесса СВС-формования относятся время задержки t_3 приложения давления (диапазон возможных значений времени задержки определяется экспериментально для каждого твердосплавного материала) и давление формования P , которое также определяется экспериментально исходя из требований к плотности продукта прессования, т.е. $z = \{t_3, P\}$.

Геометрические размеры и конфигурация рассматриваемой области (шихтового брикета, теплоизолирующей оболочки, элементов технологической установки) являются конструктивными параметрами d объекта:

- толщина стенки пресс-формы δ (определяется исходя из результатов тепловых и прочностных расчетов);
- толщина оболочки теплоизолирующего материала $\delta_{и}$ (если имеется) (как правило, используется асбестовая ткань с толщиной $\delta_{и} = 1,5$ мм);
- радиус R_1 шихтового брикета, равный внутреннему радиусу пресс-формы;
- высота шихтового брикета H_0 , равная высоте внутренней цилиндрической полости пресс-формы.

Значения параметров R_1 и H_0 определяются требованиями к размеру получаемого твердосплавного изделия, внешний радиус R_2 и высота H пресс-формы в вектор d не включаются, так как являются зависимыми параметрами ($R_2 = R_1 + \delta$, $H = H_0 + 2\delta$).

Процесс СВС-формования характеризуется вектором внутренних параметров $a = \{\rho_1, \rho_2, c_1, c_2, \alpha_1, \alpha_2\}$, где ρ_1, ρ_2 – плотности материалов шихты и пресс-формы, c_1, c_2 – удельные теплоемкости; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи. Заметим, что скорость горения U_{Γ} , температура горения T_{Γ} шихтового брикета и коэффициент теплопроводности шихты λ_1 зависят от состава обрабатываемого материала. При этом значения U_{Γ} и T_{Γ} могут быть определены с достаточной точностью лишь экспериментально для каждого отдельного состава. Поэтому процессы СВС-формования следует рассматривать в условиях неопределенности исходной информации $\xi = \{U_{\Gamma}, T_{\Gamma}, \lambda_1\}$.

Выходными переменными процессов СВС-формования являются температура T и эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ в стенке пресс-формы. Температура является функцией трех пространственных координат и времени $T = T(r, z, \varphi, t)$, где r, z, φ – радиальная, осевая, угловая координаты, соответственно.

В качестве исследуемого материала прессуемой шихты выбран образец для получения твердосплавного материала марки СТИМ-2А, в качестве материала пресс-формы, крышки, поддона – сталь 40Х. Приведем значения основных физико-механических, теплофизических и конструктивных параметров прессуемой шихты

Марка твердосплавного материала	СТИМ-2А
Состав образца, %	50 TiC; 50 (Ni-Mo-Cu)
Насыпная плотность ρ_1 , кг/м ³	3200
Температура горения T_r , К	2200 ± 25
Скорость горения U_r , мм/с	10 ± 5
Коэффициент теплопроводности λ_1 , Вт/(м·К)	14,18 ± 4
Удельная теплоемкость c_1 , Дж/(кг·К).....	666,5

и пресс-формы:

Материал.....	Сталь 40Х
Толщина стенки δ , мм	42
Высота H , мм.....	134
Внутренний радиус R_1 , мм	32,5
Внешний радиус R_2 , мм.....	74,5
Плотность материала ρ_2 , м ² /с.....	6,65·10 ⁻⁶
Коэффициент теплопроводности λ_2 , Вт/(м·К)	42,4
Удельная теплоемкость c_2 , Дж/(кг·К).....	514,3

Данные значения использованы как исходные для компьютерного моделирования процесса теплопроводности в элементах технологической оснастки процессов СВС-формования.

Тепловые модели формулируются на основе следующих допущений. Пусть химически реагирующее вещество синтезируемого материала заполняет осесимметричную область I (рис. 2). Вещество находится в теплоизоляционной оболочке, заполняющей область II. Поскольку на протяжении всего процесса между образцом и оболочкой имеет место плотный контакт, то реализуется граничное условие четвертого рода (равенство температур и тепловых потоков). От внешней поверхности пресс-формы тепло отводится в воздух конвекцией. На стадии горения-задержки по образцу, занимающему область I, распространяется волна горения (снизу вверх или сверху вниз) со скоростью U_r и температурой во фронте T_r . Полагаем, что фронт горения плоский, температура во фронте горения $T_r = \text{const}$, движение фронта равномерное с постоянной скоростью $U_r = \text{const}$.

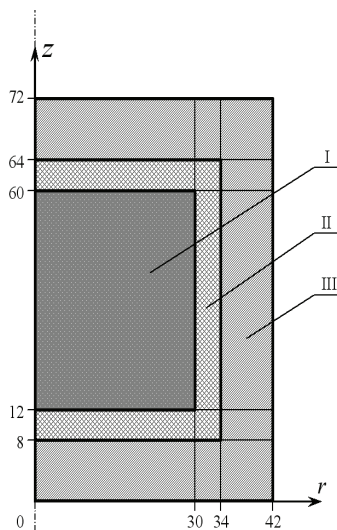


Рис. 2. Осесимметричная схема геометрических областей, в которых решаются уравнения математической модели:

- I – образец (синтезируемый материал);
- II – теплоизолирующая оболочка;
- III – корпус пресс-формы

Уравнение движения фронта горения

$$z^* = \begin{cases} H_0 - U_{\Gamma}t & (\text{поджиг сверху}); \\ U_{\Gamma}t & (\text{поджиг снизу}). \end{cases}$$

Условие на фронте

$$T(r, z^*, t) = \begin{cases} T_{\Gamma}(r, z^*, (H_0 - z^*)/U_{\Gamma}) & (\text{поджиг сверху}); \\ T_{\Gamma}(r, z^*, z^*/U_{\Gamma}) & (\text{поджиг снизу}). \end{cases}$$

За фронтом происходит остывание материала по законам кондуктивной теплопередачи (конвективными и массообменными эффектами пренебрегаем).

Уравнения движения плунжера пресса и верхней границы образца z^*

$$z^* = H_0 - U_{\Pi}t,$$

где U_{Π} – скорость плунжера пресса, мм/с.

Учитывая симметричность исследуемой системы относительно угловой координаты φ , можно считать, что температура T является функцией двух координат r и z и времени t : $T = T(r, z, t)$. При всех изложенных предпосылках исследуемый процесс СВС на стадии горения-задержки может быть описан с помощью системы дифференциальных уравнений:

– для образца I

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \nabla^2(a_1 T_1) = \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(a_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + a_1(T_1) \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) \right);$$

– теплоизолирующей оболочки II

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \nabla^2(a_2 T_2) = \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(a_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + a_2(T_2) \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) \right);$$

– пресс-формы III

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = \nabla^2(a_3 T_3) = \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(a_3(T_3) \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + a_3(T_3) \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_3(T_3) \frac{\partial T_3}{\partial z} \right) \right),$$

где a_1, a_2, a_3 – коэффициенты температуропроводности образца, теплоизолирующей оболочки и стенки пресс-формы, соответственно, $a = \lambda/(c\rho)$.

Граничные условия:

– на границе I – II

$$T_1 = T_2, \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n};$$

– на границе II – III

$$T_2 = T_3, \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n};$$

– на границе III – окружающая среда

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n} = \alpha_1(T_3 - T_0).$$

В нашем случае объектом рассмотрения является одностороннее формование, поэтому на линии раздела «пресс-форма – стол» граничное условие можно записать в виде

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial n} = \alpha_2(T_1 - T_0),$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи.

Начальные условия:

$$t = 0, \quad T_1 = T_0, \quad T_2 = \begin{cases} T_0, & z \leq \delta + H_0 \\ T_\Gamma, & \delta < z \leq \delta + \varepsilon, \end{cases}$$

где ε – малая величина, которая выбирается из условия возможности начала работы вычислительного алгоритма.

На фронте задается условие

$$T(r, z^*, z^*/U_\Gamma) = T_\Gamma.$$

Поставленная задача решена конечно-разностным методом [2]. Каждое из уравнений расщеплено на два и представлено в конечно-разностном виде. Полученные разностные уравнения решены методом прогонки в однослойных областях и методом сквозной прогонки в двухслойных.

Поскольку рассматриваемая область (см. рис. 2) симметрична относительно оси y , то можно решать задачу в половине области, используя условие симметрии относительно левой границы половины данной области

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0.$$

Для решения системы уравнений с граничными и начальными условиями строилась неравномерная сетка в областях I, II, III. Неравномерность сетки заключается в том, что линейные размеры области I (образца) во много раз больше линейных размеров областей II и III (оболочки и пресс-формы), и при переходе из области I в область II шаг по пространству первой области подстраивается к шагу по пространству второй области. В результате область решения задачи разбивается на прямоугольные ячейки.

Дифференциальные уравнения, начальные и граничные условия приводились к безразмерному виду:

$$\bar{\theta} = \frac{T - T_0}{T_\Gamma - T_0}; \quad \bar{U}_\Gamma = \frac{r_0}{a_2} U_\Gamma; \quad \bar{\tau} = \frac{a_2}{r_0^2} t; \quad A = \frac{a_1}{a_2};$$

$$\Lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}; \quad \text{Bi}_n = \frac{a_n r_0}{\lambda_1}; \quad x = \frac{r}{r_0}; \quad y = \frac{z}{r_0}.$$

Фронт горения перемещается по линейному закону $y_\Gamma = \bar{U}_\Gamma \tau$.

Для расчета температурных полей в элементах технологической оснастки при осуществлении процессов СВС-формования твердосплавных материалов была разработана программа ЭВМ в среде MATLAB [3].

При проведении СВС твердосплавных материалов имеется неопределенность информации относительно скорости U_Γ , температуры T_Γ горения и коэффициента теплопроводности λ_1 прессуемого материала. Наличие неопределенности обусловлено различными факторами, зависящими от свойств подготовленной исход-

ной шихты (пористость, влагосодержание и т.п.). В связи с этим проведены экспериментальные исследования в целях установления диапазонов изменения значений режимных переменных z и неопределенных параметров ξ .

Экспериментальные исследования процесса СВС твердосплавных материалов

Для СВС твердосплавных материалов формование может осуществляться лишь в характерном температурном диапазоне (интервале переработки) от температуры горения до температуры живучести, выше которой материал обладает еще способностью к пластическому деформированию, а ниже затвердевает. Если этот температурный интервал является узким, то процесс формования является «жестким», что означает низкую воспроизводимость процесса и жесткие технологические требования к технологической оснастке. Увеличение температурного интервала переработки создает благоприятные условия для выбора оптимальных режимных переменных. Сама способность к макроскопическому течению зависит как от уровня реологических свойств (предела текучести, сдвиговой и объемной вязкости), так и от влияния на них структурных процессов (рост и коагуляция зерен), отверждения и условий деформирования.

Экспериментальным методом проведено исследование влияния температуры T_{Γ} и скорости U_{Γ} горения прессуемого материала на характер изменения полей температуры в элементах пресс-формы (стенке, крышке, поддоне), а именно: на температуру на внутренней стенке пресс-формы T_1^c к моменту задержки $t_3 = 5,5$ с (рис. 3).

Из анализа графиков на рис. 3 можно сделать следующие выводы:

1) температура на внутренней поверхности пресс-формы T_1^c повышается прямо пропорционально повышению температуры горения прессуемого материала T_{Γ} ;

2) с увеличением скорости горения прессуемого материала U_{Γ} монотонно возрастает температура на внутренней стенке пресс-формы T_1^c .

Возрастание T_1^c объясняется тем, что при более высоких скоростях горения материал не успевает охладиться за установленное время задержки t_3 , поэтому стенка пресс-формы подвергается бóльшей температурной нагрузке.

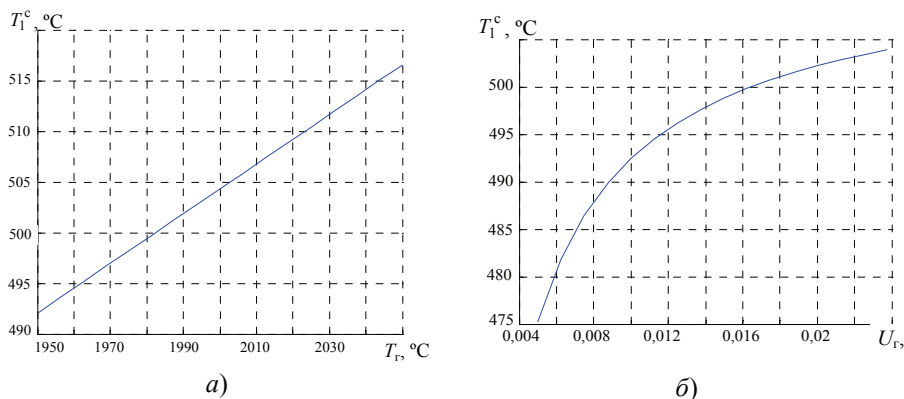


Рис. 3. Зависимость температуры на внутренней поверхности пресс-формы T_1^c :
 а – от температуры горения материала T_{Γ} ; б – от скорости горения материала U_{Γ}

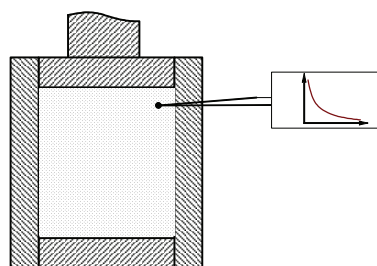
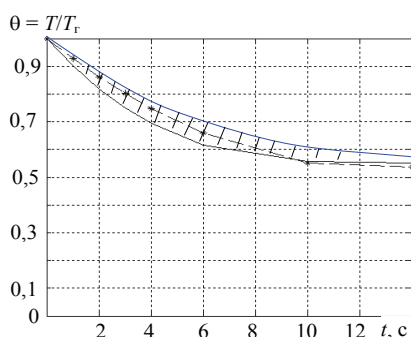
Таким образом, для СВС твердосплавных материалов различных марок установлены диапазоны изменения режимных переменных и неопределенных параметров (табл. 1).

В целях проверки адекватности математической модели проводилось сопоставление расчетных по модели и экспериментальных данных по температурам в различных точках образца и пресс-формы (рис. 4) для стадии горения-выдержки

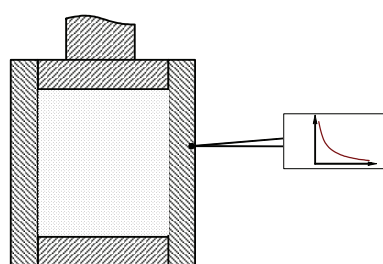
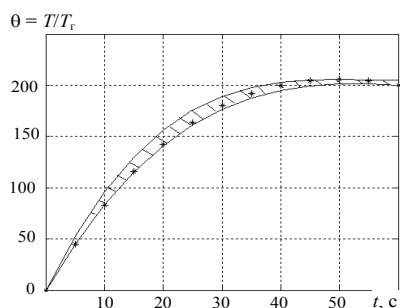
Таблица 1

**Диапазоны изменения z и ξ процесса СВС
твердосплавных материалов различных марок**

Марка сплава	Основной состав, %	$T_r, ^\circ\text{C}$	$U_r, \text{мм/с}$	$t_3, \text{с}$	$P, \text{МПа}$
Состав на основе дисилицида молибдена	$90\text{MoSi}_2+10\text{Al}_2\text{O}_3$	2800 ± 25	20 ± 5	15 ± 10	120 ± 30
СТИМ-2/30Н	$56\text{Ti}+14\text{C}+30\text{Ni}$	2000 ± 25	20 ± 5		
СТИМ-1Б/3	$76\text{TiC}+19\text{TiB}_2+5\text{Cu}$	2527 ± 25	60 ± 5		
СТИМ-2	$80\text{TiC}+20\text{Ni}$	2227 ± 25	20 ± 5		
СТИМ-2А	$50\text{TiC}+50(\text{Ni-Mo-Cu})$	1927 ± 25	10 ± 5		



a)



b)

Рис. 4. Зависимость температуры в различных точках от времени:

a – в образце; *b* – на внешней стенке пресс-формы

(сплошные линии – результаты расчета по математической модели, пунктирная линия, точки – экспериментальные данные); $D = 65 \text{ мм}$; $H_0 = 50 \text{ мм}$; $t_3 = 2 \text{ с}$; $U_r = 20 \text{ мм/с}$

и стадии формирования материалов. Экспериментальные данные получены для различных материалов прессуемой шихты и технологической оснастки на основе экспериментальных исследований, проведенных на экспериментальном стенде «ТЕСТ» [4]. Анализ сопоставления расчетных по модели и экспериментальных данных показал, что максимальное рассогласование теоретических и экспериментальных значений не превышает 10 %.

Исследование системных связей и закономерностей процессов СВС-формования твердосплавных материалов

Математическое моделирование тепловых режимов СВС-компактирования позволяет определить поля температур в стенке пресс-формы для различных режимов процесса. Входные (режимные) переменные модели – время задержки прессования t_3 (время от конца горения материала до начала нагружения внутренним давлением); давление прессования P ; параметрами – скорость U_Γ и температура T_Γ горения образца материала, толщина стенки пресс-формы δ (рис. 5). Выходные переменные модели: температура на внутренней поверхности стенки пресс-формы T_1^c к моменту времени t_3 , толщина пограничного слоя δ_1 стенки и эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, возникающие в стенке от температурных и механических воздействий. Величина δ_1 определяется заданным допустимым температурным перепадом в стенке, при котором изменения в материале пресс-формы являются обратимыми и не приводят к потере механических свойств материала стенки.

Результаты математического моделирования дают возможность как количественно, так и качественно оценить влияние входных переменных и параметров модели на изменение выходных переменных. Основным результатом исследования полей температур в стенке пресс-формы является вывод о том, что в условиях кратковременных термических нагрузок $t_3 = 0,5 \dots 10$ с процесс СВС является существенно нестационарным, а профиль температур в стенке – нелинейным (рис. 6). При увеличении времени задержки t_3 нелинейность профиля температур уменьшается и градиент температур в стенке падает, что характеризуется прогреванием пресс-формы и отводом тепла в окружающую среду. Таким образом, максимальный перепад температур в стенке относится только к начальному периоду времени, характерному для стадии горения материала. В связи с этим тепловой расчет целесообразно проводить именно для начального периода времени $t_3 = 0,5 \dots 10$ с, когда только что сгоревший материал начинает быстро остывать и стенка пресс-формы испытывает максимальные термические нагрузки в ходе всего процесса СВС-формования.



Рис. 5. Структурная схема модели тепловых режимов процесса СВС-компактирования

Методика расчета пресс-формы включает в себя следующие этапы:

1 этап. Выделяются три температурных интервала для выбранного конструкционного материала: 1) низкотемпературный интервал, в котором в материале пресс-формы не происходит никаких изменений; 2) допустимый температурный интервал, в котором если и происходят изменения в материале пресс-формы, то они являются обратимыми и не приводят к потере механических свойств; 3) высокотемпературный интервал, при работе в котором сталь данной марки теряет заданные механические свойства.

2 этап. Строится зависимость максимальной температуры T_1^c на внутренней поверхности пресс-формы от толщины стенки δ . На кривой этой зависимости выделяются высокотемпературный интервал $T_1^c > T_{кр} = 500$ °C (для $\delta < \delta_c$) и допустимый температурный интервал $T_1^c < T_{кр}$ (для $\delta > \delta_c$). Определяется значение δ_c на границе этих интервалов. Эту величину δ_c можно считать оптимальной в тепловом отношении, так как выбор стенки с большей толщиной мало сказывается на изменении температуры T_1^c , выбор меньшей толщины приводит к существенному повышению температуры на внутренней поверхности пресс-формы.

3 этап. Для рассчитанной δ_c определяется распределение температуры в пресс-форме по радиусу $T(r)$ для наиболее опасного среднего по высоте сечения.

Выделяются допустимый и низкотемпературный интервалы. Наибольший градиент температуры характерен для некоторой области непосредственно у внутренней поверхности стенки пресс-формы $[0, \delta_1]$ – зона допустимого температурного интервала (пограничный слой). Остальная же часть стенки пресс-формы $[\delta_1, \delta_c]$ работает при довольно умеренных тепловых нагрузках.

При определении значения температурного перепада по толщине стенки можно использовать традиционный подход, т.е. считать его как разность между температурами на внутренней и внешней поверхностях стенки пресс-формы: $\Delta T_{max} = T_1^c - T_2^c$. В этом случае значение ΔT_{max} будет характеризовать температурный перепад не столько по всей стенке, сколько по толщине пограничного слоя δ_1 , приходящегося на некоторую малую величину части стенки. Такое значение является завышенным.

Если же принять перепад, соответствующий основной малонагруженной в тепловом отношении части стенки $[\delta_1, \delta]$ $\Delta T_{max} = T_{\delta_1}^c - T_2^c$, и отнести его ко всей толщине, то получим явно заниженное значение. Поэтому для характеристики теплового нагружения всей стенки пресс-формы целесообразно в выражении для ΔT_{max} вместо температуры на внутренней поверхности пресс-формы использовать так называемую эффективную температуру $T_{эф}$:

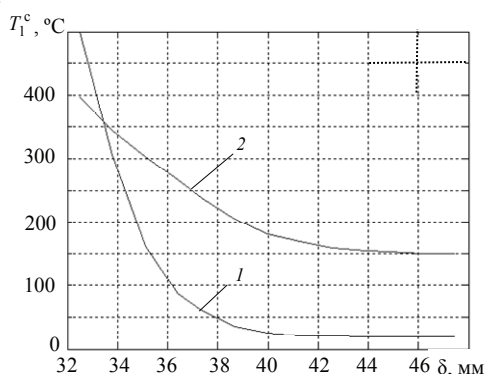


Рис. 6. Изменение профиля температур по толщине стенки $\delta = 15$ мм для различных моментов времени t , с:
1 – 3; 2 – 10

$$T_{\text{эф}} = \frac{1}{\delta_1} \int_0^{\delta_1} T dr,$$

которая является характеристикой температурного профиля и определяется размерами пограничного слоя. Такая замена физически оправдана, поскольку максимальный градиент температур возникает в узком пограничном слое в течение короткого промежутка времени после прохождения фронта горения и далее уменьшается в связи с остыванием образца.

Таким образом, температурный перепад в данном случае не является независимым параметром задачи, а связан с толщиной стенки пресс-формы. В этом принципиальное отличие предлагаемой методики от традиционного подхода к тепловому и прочностному расчетам цилиндрических обечаек (корпусов, пресс-форм и т.п.), нагруженных внутренними силовыми и температурными напряжениями.

4 этап. Расчет эквивалентных напряжений, возникающих в стенке пресс-формы под влиянием термических и механических нагрузок, и проверка условия прочности. Рассчитанные эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ определяются: давлением на пресс-форму; толщиной стенки корпуса пресс-формы; температурным перепадом по толщине стенки пресс-формы, т.е.

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\beta^3 - 1} \sqrt{3P^2 + 3Pk\Delta T + k^2 \Delta T^2},$$

где $k = \frac{\alpha_L E}{1 - \mu} \left(\frac{\beta^2}{2 \ln \beta} - 1 \right)$; $\beta = R_2/R_1$ – коэффициент толстостенности; P – рабочее давление, МПа; ΔT – температурный перепад по толщине стенки.

Окончательно выбирается толщина стенки при условии, что эквивалентные напряжения не превышают допустимых значений (допускаемое напряжение определяется для значения температуры $T = T_{\text{эф}}$). В случае невыполнения условия прочности следует увеличить значение δ_c и повторить расчет третьего и четвертого этапов методики.

Оптимизация аппаратурно-технологического оформления процессов высокотемпературного синтеза твердосплавных материалов в условиях неопределенности

При аппаратурно-технологическом оформлении процесса СВС-формования требуется определить минимальную толщину стенки пресс-формы δ_{min} и время задержки t_3 $\left(\min_{\delta, t_3} \delta(t_3) \right)$, при которых выполняются ограничения по максимальной допустимой температуре на внутренней поверхности стенки пресс-формы, температурному перепаду и напряжениям в стенке:

$$T_1^c(\delta, t_3) - T_{\text{кр}} \leq 0, \quad 10 - \frac{\delta(t_3)}{\delta_1(t_3)} \leq 0, \quad \sigma_{\text{экв.}}(t_3) - [\sigma] \leq 0,$$

где $T_1^c, T_{\text{кр}}$ – максимальная и критическая температуры на внутренней поверхности стенки пресс-формы соответственно, $T_{\text{кр}} = 500$ °С; $\sigma_{\text{экв.}}, [\sigma]$ – эквивалентные и допускаемые напряжения в стенке пресс-формы соответственно.

В качестве примера решалась задача определения минимального значения толщины стенки пресс-формы для осуществления процесса СВС-формования материалов СТИМ-2А и СТИМ-2/30Н. Конструкционный материал для изготовления обечайки пресс-формы – сталь 40Х.

Результаты решения задачи оптимизации определения толщины стенки пресс-формы для СВС-формования материалов СТИМ-2А и СТИМ-2/30Н для $P = 100$ МПа, $T_r = 2000$ °С и $U_r = 25$ мм/с приведены ниже:

Время задержки t_3 , с	5,7
Толщина δ стенки пресс-формы, мм	42,0
Температура $T_1^c(t_3)$ на внутренней поверхности стенки пресс-формы, °С	498,5
Допустимые напряжения $[\sigma]$, МПа	490,0
Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экр}}(t_3)$, МПа	$483,3 \leq [\sigma]$
Отношение $\delta(t_3)/\delta_1(t_3)$	10,0

Сравнительный анализ результатов расчета значения толщины δ стенки пресс-формы, изготовленной из стали 40Х, с использованием традиционного подхода и предложенной методики показывает, что выбор оптимального значения t_3 и расчет минимальной толщины стенки обеспечивает снижение массы пресс-формы в среднем на 25 %.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса СВС-формования твердосплавных материалов, а также технологических расчетов пресс-форм для определенного класса твердосплавных материалов установлено, что рассчитанное минимальное значение толщины стенки $\delta = 42$ мм удовлетворяет условиям прочности для составов СТИМ-2А и СТИМ-2/30Н. Для остальных составов прессуемого материала условия прочности не выполняются, поскольку возникающие нормальные и касательные напряжения превышают допустимые значения для выбранного конструкционного материала (сталь 40Х) в 2 – 4 раза.

Прежде всего это связано с тем, что для составов исходной шихты твердосплавных материалов марок СТИМ-2, СТИМ-1Б/3 и состава на основе дисилицида молибдена MoSi_2 характерны более высокие температура и скорость горения по сравнению с материалами марок СТИМ-2А и СТИМ-2/30Н. При этом тепловая нагрузка на элементы пресс-формы повышается, а температурный перепад достигает более высоких значений. В ходе анализа напряженно-деформированного состояния стенки пресс-формы с толщиной $\delta = 42$ мм установлено, что для марок СТИМ-2, СТИМ-1Б/3 и MoSi_2 значения термоупругих напряжений в элементах пресс-формы значительно выше, чем для других марок рассматриваемого класса.

Для получения твердосплавных материалов марок СТИМ-2, СТИМ-1Б/3 и MoSi_2 требуется изменить условия проведения процесса СВС-формования таким образом, чтобы снизить тепловую нагрузку на элементы пресс-формы и обеспечить заданные показатели прочности конструкции по нормальным и касательным термоупругим напряжениям.

Кроме того, при расчете пресс-формы для осуществления процесса СВС-формования твердосплавных материалов СТИМ различных марок необходимо учитывать неопределенность (неточность) информации относительно задаваемых скорости U_r и температуры T_r горения. Это объясняется различными факторами, зависящими от свойств подготовленной исходной шихты (насыпная плотность, влагосодержание и т.п.). Найденное с применением предложенной выше методи-

ки оптимальное значение толщины стенки пресс-формы без учета неопределенности U_r , T_r может привести к повреждениям пресс-формы в случае отклонения неопределенных параметров от номинальных значений.

Для обеспечения работоспособности технологической оснастки процесса СВС-формования твердосплавных материалов и определения научно обоснованного значения коэффициента запаса по толщине стенки пресс-формы была сформулирована задача минимизации толщины стенки пресс-формы в условиях неопределенности исходных данных $\xi = \{U_r \in [5...25] \text{ мм/с}, T_r \in [1950...2050] \text{ }^\circ\text{C}\}$: требуется определить время задержки t_3^* и давление на плунжере пресса P^* ($P \geq 90$ МПа), при которых достигается минимальная толщина стенки пресс-формы δ^* , т.е.

$$\min_{\delta, t_3, P} M_{\xi} \{\delta(t_3, P, \xi)\} \approx \min_{\delta, t_3, P} \sum_{i \in I_1} \gamma_i \delta(t_3, P, \xi^i), \quad (1)$$

где γ_i – весовые коэффициенты, $\sum_{i \in I_1} \gamma_i = 1$; I_1 – множество аппроксимационных

точек в области Ξ .

При связях в форме уравнений математической модели процесса СВС-формования и ограничениях:

– температуре на внутренней поверхности стенки пресс-формы

$$\max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3} T_1^c(\delta, t_3, \xi) - T_{\text{кр}} \leq 0; \quad (2)$$

– толщине пограничного слоя стенки пресс-формы

$$10 - \max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3, P} [\delta(t_3, P, \xi) / \delta_1(\delta, t_3, P, \xi)] \leq 0; \quad (3)$$

– эквивалентному напряжению в стенке

$$\max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3, P} \sigma_{\text{эkv}}(\delta, t_3, P, \xi) - [\sigma] \leq 0; \quad (4)$$

– нормальным напряжениям в стенке

$$\max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3, P} \sigma_{r, \theta, z}(\delta, t_3, P, \xi) - [\sigma_{r, \theta, z}] \leq 0; \quad (5)$$

– касательным напряжениям в стенке

$$\max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3, P} \tau_{rz}(\delta, t_3, P, \xi) - [\tau_{rz}] \leq 0. \quad (6)$$

Сформулированная задача (1)–(6) относится к классу одноэтапных задач нелинейного программирования, и ее решение осуществлялось с использованием алгоритма [5, 6].

Результаты решения задачи оптимизации аппаратурно-технологического оформления процесса СВС-формования твердосплавных изделий марок СТИМ-2А, СТИМ-2/30Н приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальные значения конструктивных параметров и режимных переменных установки СВС-формования твердосплавных материалов

Наименование	Без учета неопределенности	С учетом неопределенности
<i>Конструктивные параметры</i>		
Толщина стенки пресс-формы δ , мм	42	48,3
Внутренний радиус пресс-формы R_1 , мм	32,5	34
Высота пресс-формы, мм	134	143
<i>Режимные (управляющие) переменные</i>		
Время задержки t_3 , с	5,7	6,5
Давление прессования P , МПа	100	90
<i>Значения функций ограничений</i>		
Температура на внутренней поверхности пресс-формы T_1^c , °С	498,5	160
Толщина пограничного слоя δ_1 , мм	4,2	4,5
Эквивалентные напряжения в стенке $\sigma_{экр}$, МПа / допустимое напряжение $[\sigma]$, МПа	270 / 490	146 / 490
Максимальное значение компоненты нормальных напряжений σ , МПа / допустимое напряжение на растяжение-сжатие $[\sigma]$, МПа	483 / 490	342 / 490
Касательные напряжения τ , МПа / допустимое напряжение на сдвиг $[\tau]$, МПа	232 / 240	238 / 240

Заключение

В результате решения задачи оптимизации (1) – (6) в условиях неопределенности определены оптимальные значения толщины стенки пресс-формы $\delta^* = 48,3$ мм, времени задержки $t_3^* = 4,5$ с, давления прессования $P^* = 90$ МПа. Сравнительный анализ показывает, что при эксплуатации пресс-формы с толщиной стенки 48,3 мм независимо от случайного изменения неопределенных параметров $\xi = \{U_T \in [5...25] \text{ мм/с}, T_T \in [1950...2050] \text{ °С}\}$ в заданных интервалах качество изделий из твердосплавных материалов и работоспособность пресс-формы будут сохраняться. При этом научно обоснованный коэффициент технического ресурса по толщине стенки пресс-формы получен с учетом реального профиля температуры в стенке и составляет 15 %.

Список литературы

1. Стельмах, Л. С. Неизотермический метод расчета пресс-оснастки установки компактирования горячих продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Л. С. Стельмах, А. М. Столин, Д. С. Дворецкий // Теорет. основы хим. технологии. – 2010. – Т. 44, № 1. – С. 1 – 9.
2. Методика теплового расчета пресс-оснастки для СВС-компактирования и разработка технологических режимов / Л. С. Стельмах [и др.] // Энцикл. инженера-химика. – 2009. – № 12. – С. 16 – 26.

3. Тепловой расчет пресс-оснастки для СВС-компактирования и выбор оптимальных технологических режимов / Л. С. Стельмах [и др.] // *Технология металлов*. – 2010. – № 2. – С. 42 – 51.

4. Поляков, Б. Б. Оптимизация аппаратурно-технологического оформления высокотемпературного синтеза материалов на основе моделирования нестационарных тепловых процессов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08: защищена 16.11.2012 / Поляков Борис Борисович. – Тамбов, 2012. – 190 с.

5. Новый подход к оптимальному проектированию промышленных аппаратов химической технологии / Д. С. Дворецкий [и др.] // *Теорет. основы хим. технологии*. – 2012. – Т. 46, № 5. – С. 501 – 510.

6. Оптимизация и аппаратурно-технологическое оформление ХТП в условиях интервальной неопределенности / Д. С. Дворецкий [и др.] // *Хим. пром-сть сегодня*. – 2009. – № 4. – С. 46 – 56.

System Analysis and Optimization of the Processes of SHS-Compaction of Hard-Alloy Materials

D. S. Dvoretzkiy¹, S. I. Dvoretzkiy¹, L. S. Stelmakh², A. M. Stolin²

*Department “Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries”,
Tambov State Technical University (1), dvoretzkiy@tambov.ru;
Institute of Structural Macrokineitics and Materials Science (ISMAN),
Chernogolovka (2)*

Keywords: compaction; hard-alloy materials; mathematical modeling; modeling; optimization; self-propagating high-temperature synthesis; system analysis; temperature profile thermoelastic loadings; uncertainty; unit setting.

Abstract: Using a mathematical model of processes of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) of hard-alloy materials and their compaction (SHS-compaction), an original method of cost-efficient analysis of unit settings for these processes has been developed, which allows reduction in the consumption rate of structural material for tooling and industrial equipment by 25% on average. A one-stage problem of stochastic optimization of unit setting of SHS-compaction process of hard-alloy materials brands STIM-2A and STIM-2/30N has been formulated and solved under the interval uncertainty of speed and temperature of furnace feed. A structure of press mold with the minimal structural material consumption rate was designed which provides for the quality production of hard-alloy materials of brands STIM-2A and STIM-2/30N regardless of random changes in uncertain parameters of SHS-compaction process (combustion speed and temperature) within the given limits.

References

1. Stel'makh L.S., Stolin A.M., Dvoretzkiy D.S. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2010, vol. 44, no. 2, pp. 192-200.
2. Stel'makh L.S., Stolin A.M., Polyakov B.B., Dvoretzkiy D.S. *Entsiklopediya inzhenera-khimika*, 2009, no. 12, pp. 16-26.
3. Stel'makh L.S., Stolin A.M., Polyakov B.B., Dvoretzkiy D.S. *Tekhnologiya metallov*, 2010, no. 2, pp. 42-51.
4. Polyakov, B. B. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2012, 190 p.
5. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Ostrovskii G.M., Polyakov B.B. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2012, vol. 46, no. 5. pp. 501-510.
6. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Ostrovskii G.M., Egorov A.F. *Chemical Industry today*, 2009, no. 4, pp. 46-56.

Systemanalyse und Optimierung der Prozesse der SHS-Formung der Hartmetallmaterialien

Zusammenfassung: Unter Ausnutzung des mathematischen Modells der Prozesse der sich selbsterstreckenden Hochtemperatursynthese (SHS) der Hartmetallmaterialien und ihrer Formung (SHS-Formung) ist die originelle Methodik der rentablen Berechnung der apparaturtechnologischen Gestaltung für die Verwirklichung dieser Prozesse entwickelt. Sie erlaubt, den Verbrauch des Konstruktionsmaterials auf die Herstellung der technologischen Ausrüstung durchschnittlich auf 25 % zu verringern. Es ist die einstufige Aufgabe der stochastischen Optimierung der apparaturtechnologischen Gestaltung des Prozesses der SHS-Formung der Hartmetallmaterialien der Marken STIM-2A, STIM-2/30N unter den Bedingungen der Zwischenunbestimmtheit der Geschwindigkeit und der Temperatur des Brennens des Beschickungsgutes formuliert und gelöst. Es ist die Konstruktion der Presseform mit dem minimalen Verbrauch des Konstruktionsmaterials entworfen, die die Produktion der qualitativen Erzeugnisse aus den Hartmetallmaterialien der Marken STIM-2A, STIM-2/30N unabhängig von der zufälligen Veränderung der unbestimmten Parameter des Prozesses der SHS-Formung (der Geschwindigkeit und der Temperatur des Brennens) in den aufgegebenen Grenzen gewährleistet.

Analyse systématique et optimisation des processus (SPH)-formation des matériaux en carbure métallique

Résumé: Avec l'emploi du modèle mathématique des processus de la synthèse de la propagation indépendante de haute température (SPH) est élaborée une méthode originale du calcul économique de la formation d'appareil et de technologie pour l'exécution de ces processus permettant de diminuer la dépense du matériel de construction pour la fabrication de l'équipement technologique au moyen de 25%. Est formulé et résolu le problème à une étape de l'optimisation stochastique de la présentation d'appareil et de technologie de la (SPH)-formation des processus des matériaux en carbure métallique des marques STIM-2A et STIM-2/30N dans les conditions de l'imprécision de la vitesse et de la température de la combustion du lit de fusion. Est conçue la construction de la presse-forme assurant la qualité des produits à partir des matériaux en carbure métallique des marques STIM-2A et STIM-2/30N indépendamment du changement occasionnel des paramètres des processus (SPH)-formation (vitesse et température) dans les limites données.

Авторы: *Дворецкий Дмитрий Станиславович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Столин Александр Моисеевич* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией пластического деформирования материалов; *Стельмах Любовь Семеновна* – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Пластические деформации неорганических материалов», ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН)», г. Черноголовка.

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».