

## НОВЫЙ ПОДХОД К ПОЛУЧЕНИЮ ТУГОПЛАВКИХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий, Б.Б. Поляков,  
Л.С. Стельмах, А.М. Столин

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов; Учреждение Российской академии наук Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Россия, Московская область, г. Черноголовка*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор В.Ф. Першин*

**Ключевые слова и фразы:** математическое моделирование; оптимальное проектирование; пресс-форма; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; СВС-компактирование; термоупругие напряжения; тугоплавкие неорганические соединения.

**Аннотация:** Описан новый технологический процесс компактирования горячих продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, используемый для получения тугоплавких неорганических соединений. Изложены результаты расчета и оптимизации толщины стенки пресс-формы для СВС-компактирования твердых сплавов синтетических твердых инструментальных материалов различных марок с учетом влияния термоупругих напряжений на прочность конструкции пресс-формы.

**Обозначения и аббревиатуры:**  $D$  – внутренний диаметр пресс-формы, м;  $E$  – модуль Юнга, МПа;  $H$  – высота пресс-формы, м;  $H_0$  – начальная высота шихтового брикета, м;  $P$  –

---

Дворецкий Дмитрий Станиславович – кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Технологии продовольственных продуктов», e-mail: dvoretzky@tambov.ru; Дворецкий Станислав Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии продовольственных продуктов», проректор по научно-инновационной деятельности; Поляков Борис Борисович – аспирант кафедры «Технологии продовольственных продуктов», ТамбГТУ, г. Тамбов; Стельмах Любовь Семеновна – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Пластические деформации неорганических материалов»; Столин Александр Моисеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Пластические деформации неорганических материалов», Учреждение Российской академии наук, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Московская область, г. Черноголовка.

давление на плунжере пресса, МПа;  $T$  – температура, °С;  $T_r$  – температура горения шихтового брикета, °С;  $U_r$  – скорость горения шихтового брикета, мм/с;  $a$  – внутренний радиус пресс-формы, м;  $b$  – внешний радиус пресс-формы, м;  $g$  – функция-ограничение;  $k$  – коэффициент передачи давления на стенку пресс-формы;  $t$  – время, с;  $r$  – радиальная координата, м;  $w$  – перемещение в вертикальном направлении, м;  $z$  – вертикальная координата, м;  $\Xi$  – область изменения неопределенных параметров;  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения, 1/°С;  $\beta$  – коэффициент толстостенности;  $\delta$  – толщина стенки пресс-формы, м;  $\delta_1$  – толщина пограничного слоя стенки пресс-формы, м;  $\xi$  – вектор неопределенных параметров;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\sigma$  – нормальные напряжения, МПа;  $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентные напряжения в стенке пресс-формы, МПа;  $\tau$  – касательные напряжения, МПа; СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез; СТИМ – синтетические твердые инструментальные материалы.

## Введение

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений – технологический процесс получения материалов, основанный на химическом взаимодействии исходных реагентов в твердой фазе в форме горения. Горение здесь является экзотермической реакцией взаимодействия порошкообразных реагентов между собой или порошкообразных реагентов с жидкими или газообразными реагентами с образованием твердых химических соединений. Чаще всего, это тугоплавкие неорганические соединения (карбиды, нитриды, бориды и т.п.), не разлагающиеся при горении, и материалы на их основе [1].

Несмотря на свою древнейшую историю и богатейшую практику, процессы горения только сейчас начинают создавать новейшую СВС-технология неорганических материалов. Эта технология альтернативна традиционной, основанной на использовании внешних источников тепла (печной и плазмохимической синтезы, спекание и горячее прессование, литье и наплавка и др.). Характерные черты СВС-технологии:

- использование более дешевой химической энергии вместо электрической;
- простота оборудования, благодаря отсутствию внешних источников тепла;
- большая скорость процессов, связанная со значительным саморазогревом в волне горения;
- послойный характер выделения тепла и, как следствие этого, возможность работы с большими количествами вещества и др.

Общая схема технологии СВС включает в себя такие основные технологические стадии, как приготовление шихты из порошкообразных реа-

гентов, проведение собственно процесса СВС (сжигание шихты) и переработку продуктов горения. В настоящее время разработано около 100 технологических разновидностей СВС. Из этих разновидностей большое значение в практическом отношении имеет технология СВС-компактирования, в которой не успевший остыть пористый продукт горения подвергается уплотнению до беспористого состояния. При этом может быть организовано формообразование. Наибольшее развитие СВС-компактирование получило для изготовления изделий из твердых сплавов: режущих пластин, фильер, штампов, валков, электродов для наплавки и электроискрового легирования, мишеней для магнетронного и катодного распыления и т.д. Особенно перспективно СВС-компактирование для заполнения рынка изделий из новых безвольфрамовых твердых сплавов [2].

### Краткое описание технологии СВС-компактирования

Объектом моделирования и исследования является процесс компактирования горячих продуктов СВС в пресс-форме с целью получения тугоплавких неорганических твердосплавных материалов. Цилиндрическая пресс-форма для СВС-компактирования (рис. 1) состоит из подвижной части (пуансона) и неподвижной части (матрицы), полости которых являются негативным (обратным) отпечатком внешней поверхности заготовки изделия.

Для осуществления СВС-компактирования используются следующие операции. Из порошков металлов и неметаллов приготавливается многокомпонентная реакционная шихта в виде брикета. Брикет помещается в реакционную пресс-форму. Пропусканием электрического тока через воспламенитель инициируется горение шихтового брикета. По окончании горения через определенное время задержки прессования  $t_3$  (1–5 с), необходимое для отвода примесных газов, начинается приложение давления

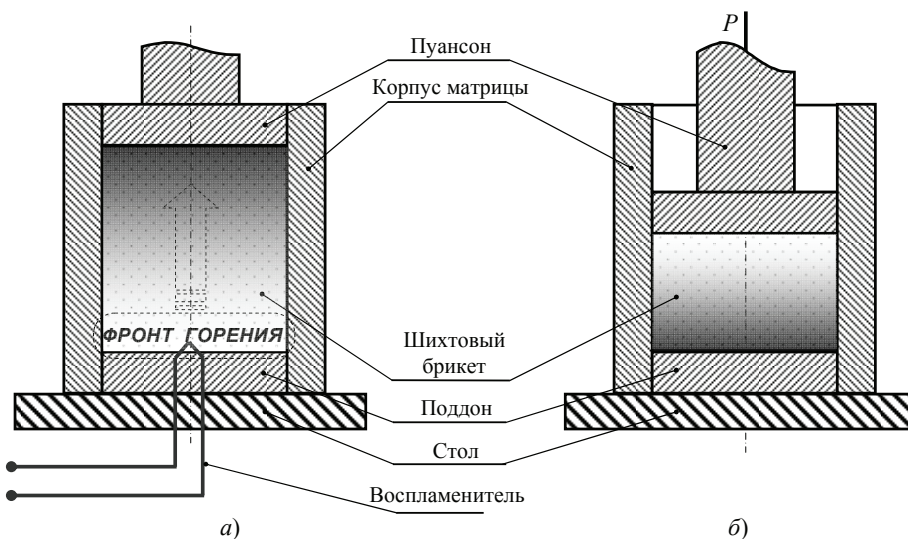


Рис. 1. Схема процесса СВС-компактирования в пресс-форме:  
*а* – горение (синтез)–задержка; *б* – прессование–выдержка

Таблица 1

**Класс твердосплавных материалов СТИМ**

Марка сплава	Основной состав, %	Температура горения шихты $T_r$ , К	Скорость горения шихты $U_r$ , мм/с	Область применения
Состав на основе				
MoSi <sub>2</sub>	90MoSi <sub>2</sub> + 10Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3073 ± 25	20 ± 5	Высокотемпературные нагреватели
СТИМ-1Б/3	76TiC + 19TiB <sub>2</sub> + 5Cu	2800 ± 25	60 ± 5	Режущий инструмент
СТИМ-2	80TiC + 20Ni	2500 ± 25	20 ± 5	Бронепластины
СТИМ-2А	50TiC + 50(Ni-Mo-Cu)	2200 ± 25	10 ± 5	Штампы, фильеры
СТИМ-3Б	90(TiC-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> ) + 10Ni	2600 ± 25	14 ± 5	Режущий инструмент

прессования  $P$  и выдержка прессуемого образца под этим давлением. Спрессованное изделие извлекается из пресс-формы и охлаждается. Весь процесс СВС-компактирования, включая сборку и разборку пресс-формы, протекает за 2–3 минуты.

Твердые сплавы, синтезируемые при СВС-компактировании, получили название СТИМ – синтетические твердые инструментальные материалы. Их основу составляют карбиды, бориды, нитриды, карбонитриды и другие соединения тугоплавких металлов (Ti, Zr, Nb, Ta и других). В данной работе предложен расчет и оптимизация толщины стенки пресс-формы для СВС-компактирования определенного класса твердосплавных материалов (табл. 1).

#### Расчет температур и напряжений в пресс-форме для СВС-компактирования

Расчет пресс-формы для компактирования указанных (см. табл. 1) твердосплавных СТИМ изделий цилиндрической формы подразумевает определение геометрических размеров пресс-формы: внутреннего диаметра  $D$ , толщины стенки  $\delta$  и высоты  $H$ . Главной задачей является определение толщины стенки, так как диаметр пресс-формы принимается равным диаметру требуемого СТИМ изделия, а высота определяется по формуле  $H = H_0 + 2\delta$ , где  $H_0$  – начальная высота шихтового брикета прессуемого материала. Толщина стенки выбирается исходя из выполнения условия прочности по нормальным напряжениям в стенке, возникающим от действия высоких температур и механических нагрузок.

Для расчета температур в стенке пресс-формы для СВС-компактирования в [4] разработана математическая модель, позволяющая рассчитать температуру как функцию двух координат  $r$ ,  $z$  и времени  $t$ :  $T = f(r, z, t)$ . Модель включает нелинейные уравнения теплопроводности и движения фронта горения шихты в пресс-форме с краевыми условиями; входными переменными модели являются время задержки прессования  $t_3$  и давление на плунжере пресса  $P$ . Численные расчеты по модели показали, что наиболее высокие температуры ( $T = 500$  °С) развиваются в средней части пресс-формы и на внутренней поверхности стенки (рис. 2).

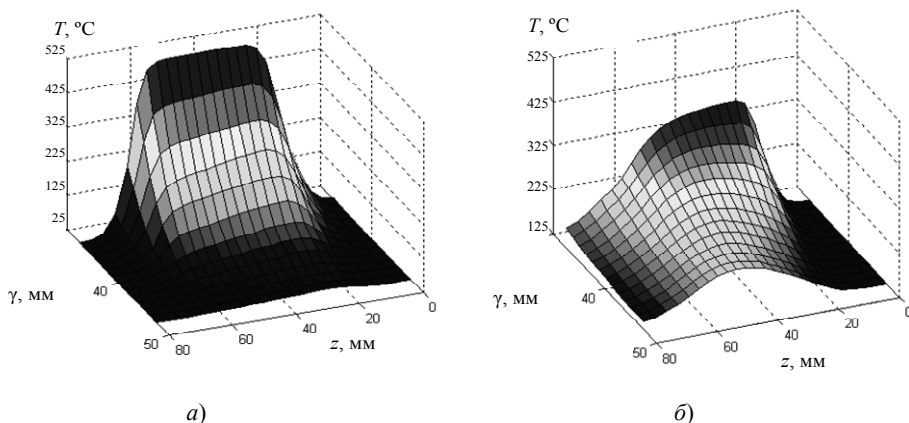


Рис. 2. Распределение температуры в стенке пресс-формы в момент времени  $t$ , с:  
*a* – 5; *б* – 10

Образование твердых сплавов в пресс-формах протекает за короткий промежуток времени ( $t = 0,5 \dots 15$  с) при высоких температуре и давлении ( $T = 2000 \dots 3000$  °С,  $P = 100$  МПа). При этом процесс теплопроводности является нестационарным, наблюдается высокий градиент температуры по радиусу и высоте пресс-формы (рис. 2). В цилиндрической стенке возникают термоупругие напряжения, наличие которых обусловлено кратковременностью процесса СВС-компактирования и неравномерной тепловой нагрузкой по стенке.

В работе [5] была предложена методика теплового и прочностного расчетов пресс-формы для СВС-компактирования, учитывающая существенную градиентность температур в стенке и нестационарность процесса СВС. Работоспособность пресс-формы оценивалась по величине эквивалентных напряжений, зависящих от температурного перепада  $\Delta T$ , давления  $P$  и коэффициента толстостенности  $\beta$ . К недостаткам данной методики можно отнести следующее:

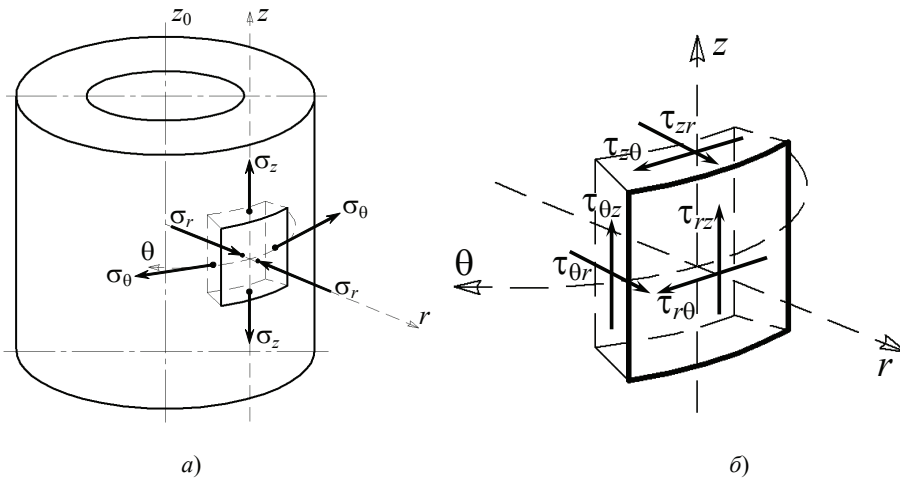
1) эквивалентные напряжения рассчитаны для постоянного градиента температур по высоте и стенке пресс-формы, тогда как  $\partial T/\partial z \neq \text{const}$  и  $\partial T/\partial r \neq \text{const}$ ;

2) нет возможности установить участки растяжения и участки сжатия по сечению пресс-формы;

3) не учитывается влияние касательных напряжений и не оценивается прочность конструкции на сдвиг.

Поэтому для всестороннего анализа прочности рассчитанной по предложенной методике пресс-формы был проведен анализ напряженно-деформированного состояния, заключающийся в определении величины и характера действия (растяжение–сжатие) термоупругих напряжений в стенке пресс-формы.

Рассматривая процесс СВС-компактирования во времени, наиболее опасным моментом можно считать  $t = t_3$ , когда начинается прессование горячих продуктов синтеза. Для данного момента характерны наибольший перепад  $\Delta T$  и градиент температур  $\partial T/\partial r$  по стенке в течение стадии



**Рис. 3. Напряженное состояние элемента цилиндрической стенки пресс-формы:**  
*a* – компоненты нормальных напряжений:  $\sigma_r$  – радиальная,  $\sigma_\theta$  – тангенциальная,  $\sigma_z$  – осевая; *б* – компоненты касательных напряжений

прессования. Термоупругие напряжения, величина которых прямо пропорциональна  $\Delta T$  и  $\partial T/\partial r$ , достигают наибольших значений в момент времени  $t = t_3$ . Для данного момента времени проводился анализ напряженно-деформированного состояния пресс-формы. После этого проводилась проверка условия прочности по максимальным нормальным напряжениям и подбиралась расчетная толщина стенки пресс-формы.

В работе [6] получено решение модели напряженно-деформированного состояния цилиндрического упругого тела в условиях двумерного поля температур  $T = T(r, z)$ .

С использованием полученного решения были определены компоненты нормальных ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ) и касательных  $\tau_{rz}$  напряжений (рис. 3) при граничных условиях (боковые поверхности пресс-формы свободны от нагрузок и не закреплены):  $\sigma_r(r = a) = Pk$ ,  $\sigma_r(r = b) = 0$ ,  $w(z = 0) = 0$ ,  $\tau_{rz}(r = b) = 0$ .

$$\begin{aligned} \sigma_r = & k_1 \left[ -1/r^2 f_1(r) + (r^2 - a^2)/((b^2 - a^2)r^2) f_2(r) \right] + \\ & + k_2 \left[ -f_3(r) + (r^2 - a^2)b^2/((b^2 - a^2)r^2) f_4(r) \right] + \\ & + k_3 \left[ -1/r^2 f_5(r) + (r^2 - a^2)/((b^2 - a^2)r^2) f_6(r) \right] + P^*; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & k_1 \left[ -1/r^2 f_1(r) + (r^2 + a^2)/((b^2 - a^2)r^2) f_2(r) - T \right] + \\ & + k_2 \left[ -f_3(r) + (r^2 + a^2)b^2/((b^2 - a^2)r^2) f_4(r) \right] + \\ & + k_3 \left[ 1/r^2 f_5(r) + (r^2 - a^2)/((b^2 - a^2)r^2) f_6(r) \right] + P^*; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_z = & k_1 \left[ 2\nu/(b^2 - a^2) f_2(r) - T \right] + k_2 2\nu b^2/(b^2 - a^2) f_4(r) + \\ & + k_3 2\nu/(b^2 - a^2) f_6(r) + k_4 f_3(r) + 2\nu a^2/(b^2 - a^2) Pk; \end{aligned}$$

$$\tau_{rz} = -\alpha E / (1 - 2\nu) 1/r \int_r^b \frac{\partial T}{\partial z} r dr,$$

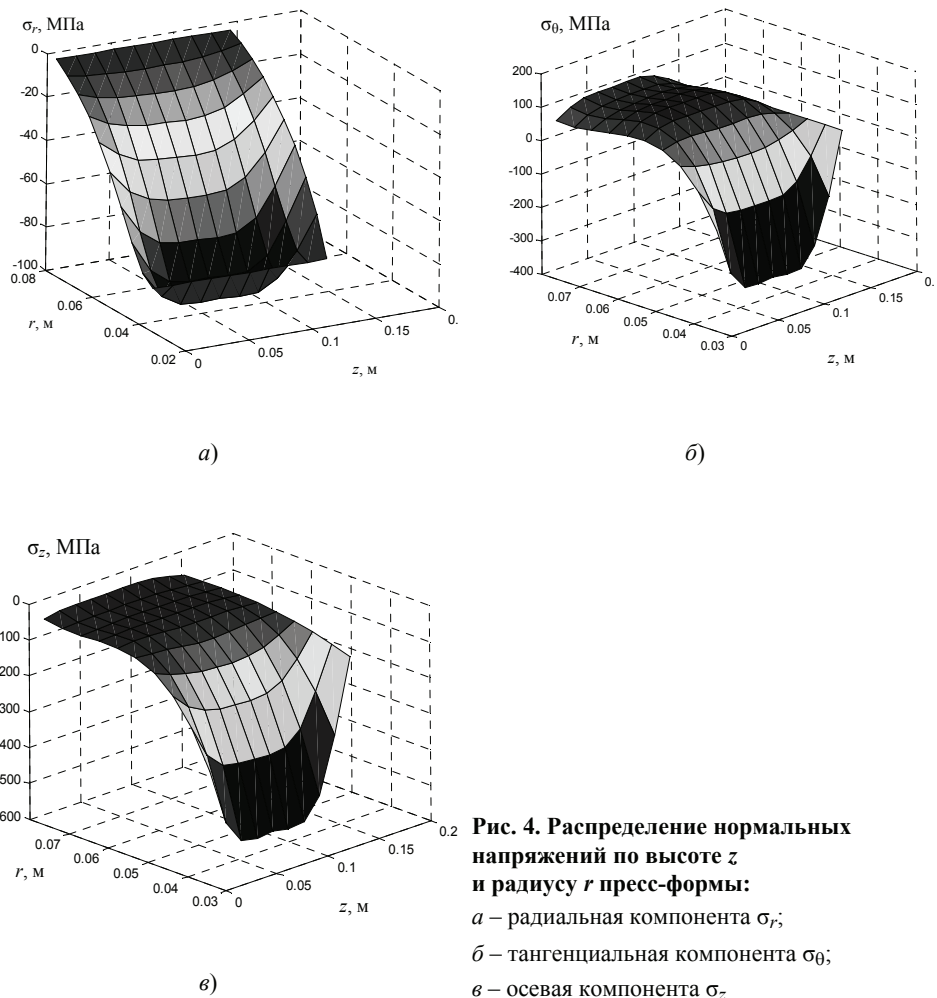
где  $k_1 = \alpha E / (1 - \nu)$ ;  $k_2 = \alpha E / (2(1 - \nu))$ ;  $k_3 = \alpha E / (2(1 - \nu)(1 - 2\nu))$ ;  
 $k_4 = \alpha E (2 - \nu) / ((1 - \nu)(1 - 2\nu))$ ;  $P^* = (r^2 - b^2) a^2 / ((b^2 - a^2) r^2) P k$ ;

$$f_1(r) = \int_a^r T r dr; \quad f_2(r) = \int_a^b T r dr; \quad f_3(r) = \int_a^r 1/r f^*(r) dr, \quad f_4(r) = \int_a^b 1/r f^*(r) dr;$$

$$f_5(r) = \int_a^r r f^*(r) dr; \quad f_6(r) = \int_a^b r f^*(r) dr; \quad f^*(r) = \int_a^r \partial^2 T / \partial z^2 r dr; \quad 0,5 \leq k \leq 1 -$$

коэффициент передачи давления на стенку пресс-формы.

Расчет напряжений осуществлен для момента времени  $t = t_3$ . Как видно из рис. 4, наибольшие значения нормальных напряжений  $\sigma$  сосредоточены



**Рис. 4. Распределение нормальных напряжений по высоте  $z$  и радиусу  $r$  пресс-формы:**  
 а – радиальная компонента  $\sigma_r$ ;  
 б – тангенциальная компонента  $\sigma_\theta$ ;  
 в – осевая компонента  $\sigma_z$

чены в средней части пресс-формы по высоте и внутренней поверхности по радиусу, то есть в зонах наибольших значений  $\Delta T$  и  $\partial T/\partial r$ . Наибольшие значения касательных напряжений (рис. 5) возникают в торцах цилиндрической пресс-формы, тогда как в средней части  $\tau_{rz} = 0$ .

В результате анализа напряженно-деформированного состояния рассчитанной в работе [5] конструкции пресс-формы с толщиной стенки  $\delta = 42$  мм было установлено, что возникающие нормальные и касательные напряжения превышают допускаемые значения для выбранного конструкционного материала (сталь 40Х) в 2–4 раза (табл. 2).

Для того чтобы обеспечить выполнение условий прочности по нормальным и касательным напряжениям в стенке пресс-формы  $\delta = 42$  мм, целесообразно проводить процесс СВС-компактирования с применением теплоизолирующего материала. Таким материалом может служить оболочка из асбестовой ткани толщиной 1,5 мм, в которую помещают исходный шихтовый брикет. Благодаря устранению непосредственного контакта

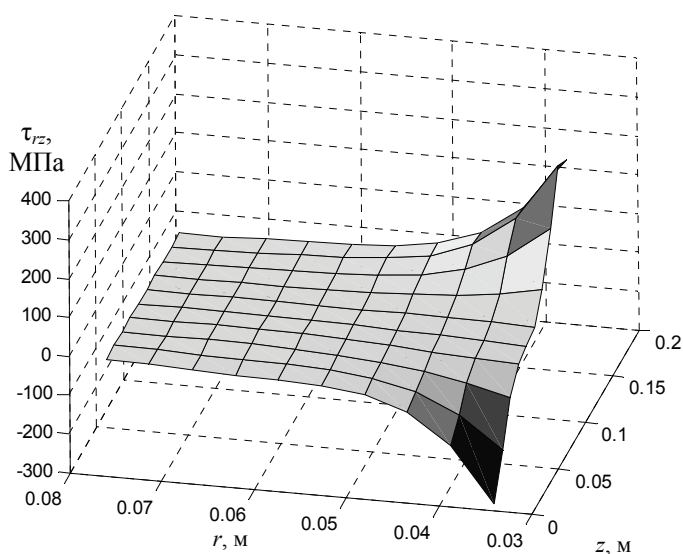


Рис. 5. Распределение касательных напряжений  $\tau_{rz}$  по высоте  $z$  и радиусу  $r$  пресс-формы

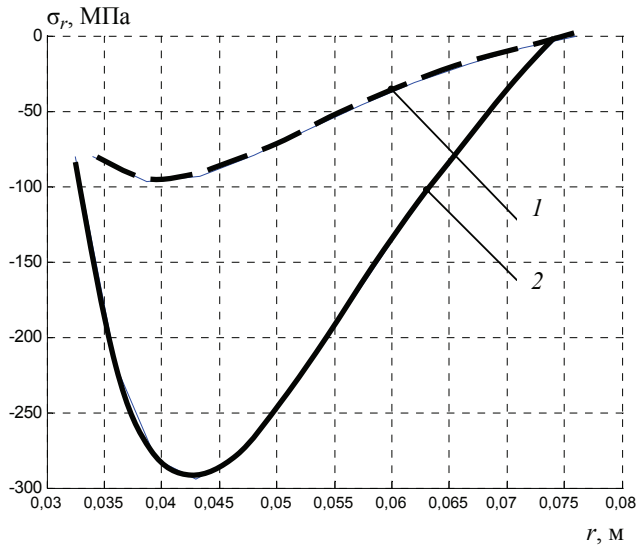
Таблица 2

**Напряжения в стенке пресс-формы  $\delta = 42$  мм и допускаемые значения**

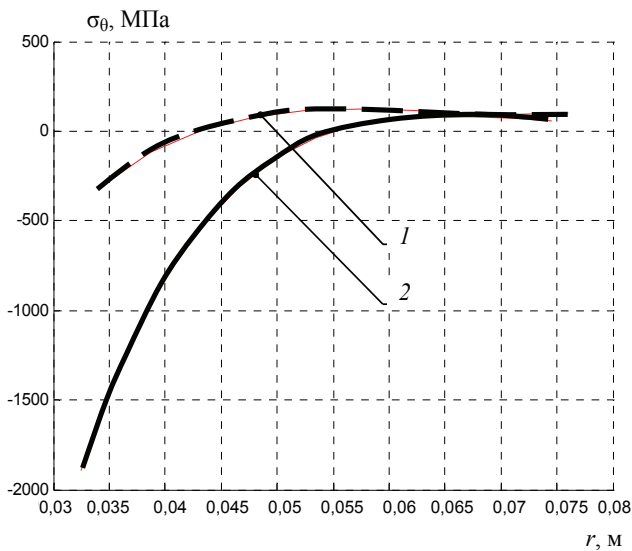
Напряжения в стенке	Наибольшие значения напряжений, МПа		Допускаемые значения напряжений, МПа	
	растяжение	сжатие	растяжение	сжатие
$\sigma_r$	0	295	490	490
$\sigma_\theta$	82	1904	490	490
$\sigma_z$	0	1980		
$\tau_{rz}$	1361		240	



между стенкой пресс-формы и горячим продуктом СВС значение перепада температур по стенке  $\Delta T$  снижается в 4–5 раз, вследствие чего существенно снижаются значения термоупругих напряжений в стенке (рис. 6, 7). В таблице 3 приведены результаты расчета напряжений при использовании теплоизолирующей оболочки. Таким образом, благодаря использованию теплоизолирующей оболочки обеспечено выполнение условий прочности по нормальным напряжениям и на сдвиг.



а)



б)

**Рис. 6. Максимальные значения нормальных напряжений при наличии (кривая 1) и отсутствии (кривая 2) теплоизолирующей оболочки (начало):**

*a* – радиальная компонента  $\sigma_r$ ; *б* – тангенциальная компонента  $\sigma_\theta$

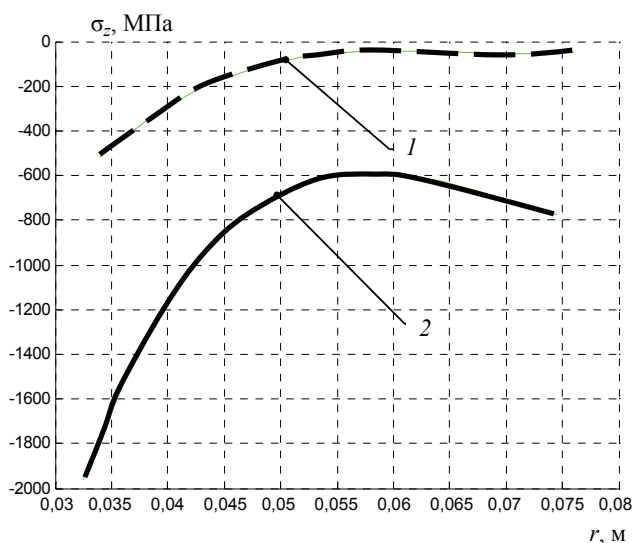


Рис. 6. Окончание:  $\sigma_z$  – осевая компонента  $\sigma_z$

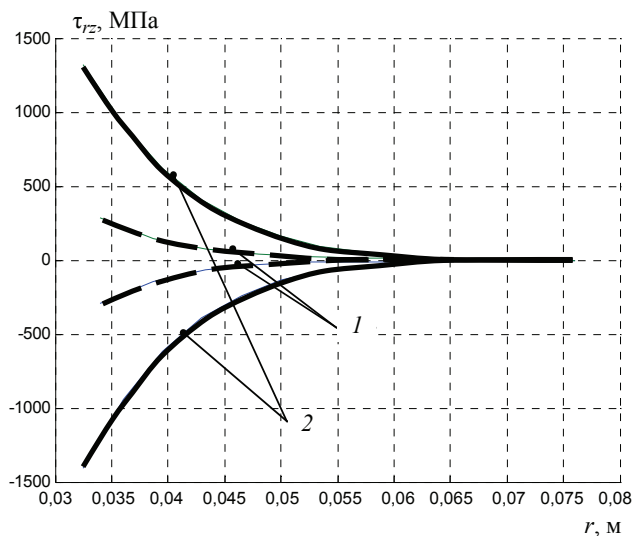


Рис. 7. Максимальные значения касательных напряжений  $\tau_{rz}$  при наличии (кривая 1) и отсутствии (кривая 2) теплоизолирующей оболочки

Таблица 3

**Напряжения в стенке пресс-формы  $\delta = 42$  мм при использовании теплоизолирующей оболочки**

Напряжения в стенке	Наибольшие значения напряжений, МПа		Допускаемые значения напряжений, МПа	
	растяжение	сжатие	растяжение	сжатие
$\sigma_r$	0	95		
$\sigma_\theta$	105	350	490	490
$\sigma_z$	0	483		
$\tau_{rz}$	238		240	

## Оптимизация толщины стенки пресс-формы для СВС-компактирования

При расчете пресс-формы для СВС-компактирования твердых сплавов СТИМ различных марок существует неопределенность информации относительно  $U_T$  и  $T_T$  (см. табл. 1). Это объясняется различными факторами, зависящими от свойств подготовленной исходной шихты (насыпная плотность, влагосодержание и т.п.). Поэтому для решения задачи прочностного расчета пресс-формы была использована постановка задачи оптимизации в условиях неопределенности, где в качестве неопределенных параметров  $\xi$  выступают  $U_T$  и  $T_T$ .

Задача оптимизации толщины стенки пресс-формы для СВС-компактирования формулируется следующим образом: требуется определить время задержки  $t_3^*$  и давление на плунжере пресса  $P^*$ , при которых достигается минимальная толщина стенки пресс-формы  $\delta^*$ , то есть

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

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

онных точек в области  $\Xi$ ; при связях в форме уравнений математической модели теплопроводности [4], уравнениях модели напряженно-деформированного состояния [6] и ограничениях:

– по температуре на внутренней стенке пресс-формы

$$g_1(\delta, t_3, P, \xi) = \max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3} T_1(\delta, t_3, P, \xi) - T_{1\text{доп}} \leq 0; \quad (2)$$

– по толщине пограничного слоя стенки пресс-формы

$$g_2(\delta, t_3, P, \xi) = \max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3, P} \delta_1(\delta, t_3, P, \xi) - \delta_{1\text{зад}} \leq 0; \quad (3)$$

– по эквивалентному напряжению в стенке

$$g_3(\delta, t_3, P, \xi) = \max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3, P} \sigma_{\text{экр}}(\delta, t_3, P, \xi) - \sigma \leq 0; \quad (4)$$

– по нормальным напряжениям в стенке

$$g_4(\delta, t_3, P, \xi) = \max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3, P} \sigma_{r,\theta,z}(\delta, t_3, P, \xi) - \sigma_{r,\theta,z} \leq 0; \quad (5)$$

– по касательным напряжениям в стенке

$$g_5(\delta, t_3, P, \xi) = \max_{\xi \in \Xi} \min_{t_3, P} \tau_{rz}(\delta, t_3, P, \xi) - \tau_{r,\theta,z} \leq 0; \quad (6)$$

Сформулированная задача (1) – (6) относится к классу одноэтапных задач оптимизации и ее решение осуществлялось на базе алгоритмов и рекомендаций, предложенных в [4].

В результате решения задачи оптимизации на примере получения твердого сплава на основе  $\text{MoSi}_2$  определены оптимальные значения толщины стенки пресс-формы –  $\delta^* = 45$  мм, времени задержки  $t_3^* = 6,5$  с, давления прессования  $P^* = 90$  МПа. Сравнительный анализ показывает, что для обеспечения прочности конструкции толщина стенки пресс-формы должна быть увеличена на 3 мм, время задержки должно быть увеличено на 2 с, давление прессования снижено на 10 МПа по сравнению с результатами расчета пресс-формы без учета влияния термоупругих напряжений.

### Заключение

Компактирование горячих продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза представляет собой новый эффективный подход к получению тугоплавких неорганических соединений. В его основу положен принцип использования внутреннего тепловыделения в химических реакциях с твердыми продуктами. Для данного подхода характерно наличие высоких силовых и температурных нагрузок в стенках корпусов пресс-форм, накладывающихся в разные временные интервалы. В связи с этим требуется детальное изучение нестационарности, неизотермичности, качественно различного уровня температурной градиентности в стенках пресс-форм.

Рассмотрены расчет и оптимизация толщины стенки пресс-формы для СВС-компактирования на основе математического моделирования температурных полей и анализа напряженно-деформированного состояния стенки пресс-формы. В результате прочностного расчета получено оптимальное значение толщины стенки пресс-формы СВС-компактирования твердосплавных материалов.

### Список литературы

1. Амосов, А.П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов : учеб. пособие / А.П. Амосов, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов ; под науч. ред. В.Н. Анциферова. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 471 с.
2. Мержанов, А.Г. Силовое компактирование и высокотемпературная реодинамика / А.Г. Мержанов, А.М. Столин // Инженер.-физ. журн. – 1992. – Т. 63, № 5. – С. 515–516.
3. Островский, Г.М. Технические системы в условиях неопределенности: анализ гибкости и оптимизация / Г.М. Островский, Ю.М. Волин. – М. : Бином, 2008. – 320 с.
4. Стельмах, Л.С. Математическое моделирование тепловых режимов силового СВС-компактирования / Л.С. Стельмах, Н.Н. Жилиева, А.М. Столин // Инженер.-физ. журн. – 1992. – Т. 63, № 5. – С. 623–629.
5. 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.

6. Столин, А.М. Аналитическая модель напряженно-деформированного состояния осесимметричного упругого тела в условиях двумерного поля температур / А.М. Столин, Л.С. Стельмах, Н.Н. Жилиева // Инженер.-физ. журн. – 1989. – Т. 56, № 4. – С. 650–657.

---

**A New Approach to Producing Refractory Inorganic Compounds Based on Self-Propagating High Temperature Synthesis**

**D.S. Dvoretzky, S.I. Dvoretzky, B.B. Polyakov,  
L.S. Stelmakh, A.M. Stolin**

*Tambov State Technical University, Tambov,  
Russian Academy of Sciences Institute of Structural  
Macrokineitics and Materials Science RAS,  
Chernogolovka, Russia*

**Key words and phrases:** mathematical modeling; mold; optimal design; refractory inorganic compounds; self-propagating high temperature synthesis; SHS-compaction; thermoelastic stresses.

**Abstract:** A new technological process of compaction of hot self-propagating high temperature synthesis products used to produce refractory inorganic compounds is shown. The results of calculation and optimization of the wall thickness of the mold for compacting SHS hard metal STIM of various brands with the influence of thermal stress on the structural strength of the mold are described.

---

© Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий, Б.Б. Поляков,  
Л.С. Стельмах, А.М. Столин, 2012