

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕСС-ФОРМ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПСЕВДОИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

В.П. Ашихмин, О.В. Бирюков, В.А. Гурин, Б.Б. Затолока, В.В. Колосенко, С.Ю. Саенко
Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ;
Д.В. Лавинский, О.К. Морачковский
Национальный технический университет ХПИ, г. Харьков, Украина

Представлены методы расчета и результаты анализа прочности пресс-форм с наружными цилиндрами из углерод-углеродных композитных материалов (УУКМ), применяемых в ННЦ ХФТИ для прессования изделий методом псевдоизостатического прессования под давлением до 100 МПа и температуре до 1800 °С. Стенка цилиндра пресс-формы моделируется телом вращения из УУКМ под внутренним давлением. Анализ прочности основан на методе конечных элементов (МКЭ) и численном решении на персональном компьютере (ПК) системы разрешающих уравнений МКЭ. Приведены расчетные данные для максимальных значений интенсивности напряжений в зависимости от отношения внутреннего диаметра стенки к наружному (параметр толстостенности d_1/d_2) при разных значениях отношения длины нагруженного участка к длине цилиндра (ℓ/L). По данным расчета можно проектировать пресс-формы заданных размеров.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

При прессовании изделий давлением 40 МПа и температуре ~1800 °С методом псевдоизостатического прессования в качестве среды, передающей давление, могут использоваться порошки тугоплавких соединений. При давлениях > 40 МПа пресс-формы могут разрушаться. Для повышения прочности пресс-форм используют поддерживающие цилиндры из УУКМ [1]. Для обоснованного выбора цилиндров, выполненных из УУКМ, необходимы расчетные данные по анализу их прочности при разных относительных размерах: толстостенности d_1/d_2 и отношения длины нагруженного участка цилиндра в конце прессования к общей его длине ℓ/L , где d_1 и d_2 – внутренний и наружный диаметры цилиндра из УУКМ, ℓ и L – длина нагруженного участка и общая длина цилиндра.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Общий вид пресс-формы приведен на рис. 1. Элементы пресс-формы включают двухслойный цилиндрический корпус с внутренним цилиндром-вкладышем, выполненным из графита (1), и наружным несущим цилиндром, изготовленным из УУКМ, который без зазора одет на внутренний цилиндр (2); верхний и нижний пуансоны из УУКМ (3, 4). Изделия прессуются с помощью порошка (5). Силовые воздействия и геометрические параметры элементов пресс-формы обозначены на рис. 1, где P – осевая сила; p – давление прессования; p_1 , p_2 – радиальные давления на внутренний и наружный цилиндры; L – длина пресс-формы; ℓ – расстояние между пуансонами в конце прессования; h_1 , h_2 – толщины внутреннего цилиндра-вкладыша и наружного цилиндра.

Для расчетов на прочность использовано решение задачи об упругом деформировании толстостенного цилиндра, находящегося под внутренним давлением от вкладыша на участке длиной ℓ . Напряженно-деформированное состояние (НДС) наружного цилиндра при отсутствии объемных сил определяется системой дифференциальных уравнений равновесия [2]:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad \sigma_{ij}n_j = p_{in}, \quad \forall x \in L_p, \quad (1)$$

где L_p – поверхность, на которую действует давление от вкладыша на наружный цилиндр.

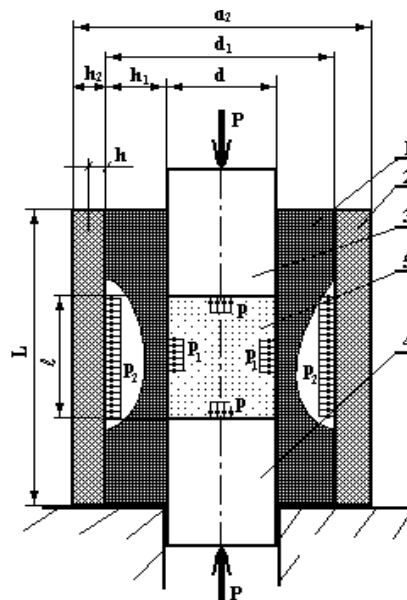


Рис. 1. Пресс-форма для псевдоизостатического прессования

В общем случае для точек, принадлежащих контактной поверхности, условия их сопряжения отвечают неравенствам:

$$u_n^{m-1} + u_n^{m+1} - \delta_{on}^m \leq 0, \sigma_{nn}^m \leq 0, \quad (2)$$

где $u_n^{m-1}, u_n^{m+1}, \delta_{on}^m$ – нормальные перемещения точек поверхностей контактируемых областей и начальный натяг (зазор); σ_{nn}^m – нормальные напряжения на контактирующих поверхностях.

Первое условие в соотношениях (2) физически отвечает «не проникновению» контактируемых тел. При выборе зазора между телами возникает контактное давление. Второе условие отвечает сжатию между стенками в пределах области контакта.

Величина радиального давления порошка на внутреннюю стенку вкладыша из графита меньше давления прессования и зависит от физико-механических свойств порошка. Коэффициент бокового давления для порошков типа карбид вольфрама, кобальта, никеля равен 0,3 от осевого давления прессования [3].

Механизмы контактного взаимодействия между соответствующими точками областей контактируемых поверхностей моделировались путем учета влияния внутреннего цилиндра-вкладыша, воспринимающего часть радиальной нагрузки и уменьшающего радиальное давление на наружный цилиндр. Расчет двухслойного толстостенного цилиндра вкладыш–наружный цилиндр, нагруженного внутренним давлением p_1 на длине вкладыша l , показал, что давление на стенку наружного цилиндра p_2 меньше давления на вкладыш. Это давление зависит от толщины стенки вкладыша и примерно равно $p_2 = p_1 \frac{d_1}{d_2}$, что совпадает с рекомендациями работы [4] о редуцировании радиального напряжения в двухслойных пресс-формах. В пределах возможной области контакта этот слой позволяет «внешнюю нелинейность» неравенств (2) свести к «внутренней нелинейности» контактного слоя и рассмотреть взаимодействие тел, разделенных слоем с известными нелинейными свойствами. С помощью описанного выше моделирования можно отразить такие механизмы взаимодействия контактирующих тел, как сцепление, проскальзывание, сухое трение и другие. В расчетах условия фрикционного взаимодействия приняты в форме законов Кулона или Зибеля в зависимости от типа возможного контакта.

Обобщенные уравнения состояния, которые устанавливают связь между напряжениями и деформациями в точках деформирующихся тел, представлены тензорно-линейными соотношениями вида:

$$\varepsilon_{ij} = A_{ijkl} \sigma_{kl} + \alpha_{ij} \Delta T, \quad (3)$$

где A_{ijkl}, α_{ij} – компоненты тензоров, отвечающие принятому закону свойств деформирования и температурного расширения-сжатия материалов графита и УУКМ. Величина окружного напряжения в наружном цилиндре от давления вкладыша при нагреве до 1800 °С невелика: $(\sigma_\theta)_T \sim 3,0$ МПа и в дальнейших расчетах не учитывается.

В пределах линейной упругости материала соотношение (3) отвечает обобщенному закону Гука.

Для упругопластического деформирования при простом нагружении и при рассмотрении малых пластических деформаций в соотношении (3)

$$A_{ijkl} = \frac{1}{E_*} [(1 + \nu_*) \delta_{ik} \delta_{jl} - \nu_* \delta_{ij} \delta_{kl}], \quad (4)$$

где E_*, ν_* – переменные параметры упругости, которые определяются связью между интенсивностями напряжений σ_i и деформаций соответственно диаграмме деформирования материала.

В этом случае (3), (4) отвечают деформационной теории малых упругопластических деформаций Ильюшина в форме переменных параметров упругости.

Далее в расчетах использован вариационный принцип Лагранжа и конечно-элементная (КЭ) схема матрицы (рис. 2). Базовым КЭ принят четырех-узловой изопараметрический элемент с билинейной аппроксимацией перемещений.

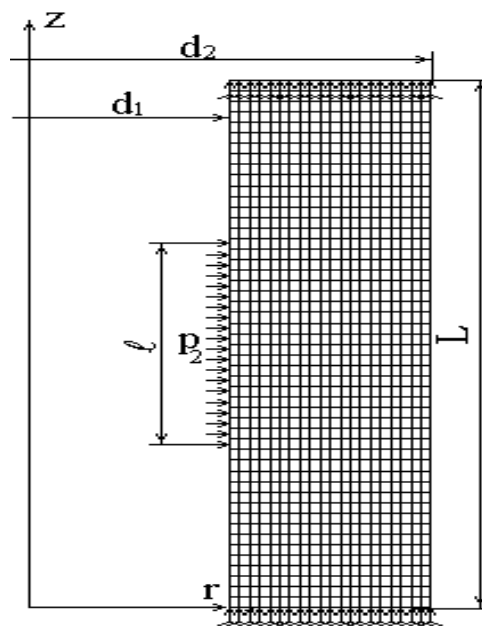


Рис. 2. КЭ схема наружного цилиндра

Методика решения задач о деформировании стенки наружного цилиндра принята отвечающей единой итерационной схеме. С этой целью в расчетах принято пошаговое приложение давления с итерационной схемой поиска неизвестных узловых перемещений, аналогичной методике переменных параметров упругости для решения задач упруго-пластического деформирования. На каждом шаге линеаризованная система уравнений МКЭ имела вид:

$$[K_{N-1}] \{U_N\} = \{F\} - \{F_{N-1}^{TEMP}\}, \quad (5)$$

где N – номер итерации; $[K]$ – глобальная матрица жесткости КЭ модели; $\{U\}$ – вектор узловых перемещений КЭ модели; $\{F\}$ – вектор внешних сил, приведенных к узлам КЭ сетки; $\{F^{TEMP}\}$ – вектор температурных нагрузок, приведенных к узлам КЭ сетки.

Итерационный процесс по определению зон контакта и пластичности продолжается до тех пор, пока не достигается наперед заданная точность выполнения условий

(2). Предложенный метод реализован в программном модуле для программного комплекса SPACE-T [5].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ НА ПРОЧНОСТЬ НАРУЖНОГО ЦИЛИНДРА

Расчеты на прочность стенок вкладыша и матрицы выполнены при следующих данных о свойствах материала при температуре ~ 1800 °С.

Вкладыш – графит марки АРВ-1 [6]. Предел прочности на растяжение 15 МПа; на сжатие 51,5 МПа; модуль упругости $1,05 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона 0,2; коэффициент температурного расширения $6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Матрица из УУКМ [1]. Предел прочности на растяжение 110 МПа; предел прочности на сжатие 100 МПа; модуль упругости $1,8 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона 0,19; коэффициент температурного расширения $3,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Данные расчетов напряженно-деформированного состояния матрицы приведены на рис. 3–5.

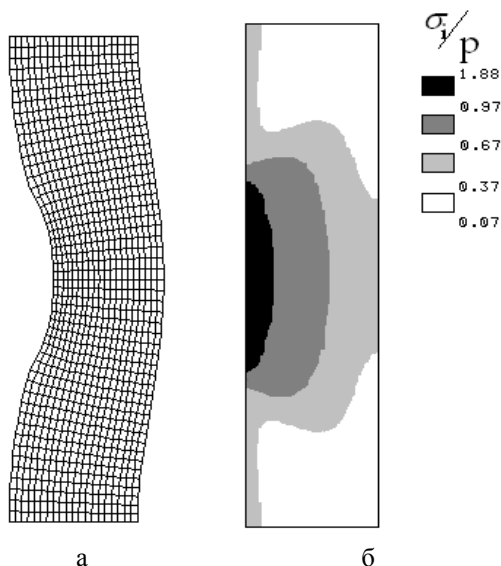


Рис. 3. Деформированная форма (а) и распределение интенсивностей напряжений по сечению стенки (б) наружного цилиндра

Деформированная форма наружного цилиндра показана на рис. 3,а. По данным об искажении сетки КЭ модели можно судить о деформировании стенки, причем, как можно заметить, область максимальных деформаций наблюдается в зоне нагруженного участка наружного цилиндра. Анализ напряженно-деформированного состояния позволил установить распределение интенсивностей напряжений по меридиональному сечению стенки наружного цилиндра (см. рис. 3,б).

Закономерности в распределениях интенсивностей напряжений по толщине стенки в наиболее нагруженном сечении и внутренней поверхности наружного цилиндра устанавливаются по данным на рис. 4 и 5. Здесь приведены распределение интенсивностей напряжений по толщине стенки в опасном сечении (см. рис. 4) и максимальные значения

интенсивностей напряжений на внутренней поверхности наружного цилиндра (см. рис. 5) с $d_1/d_2 = 0,5$ и $\ell/L = 0,4$ вдоль ее длины L.

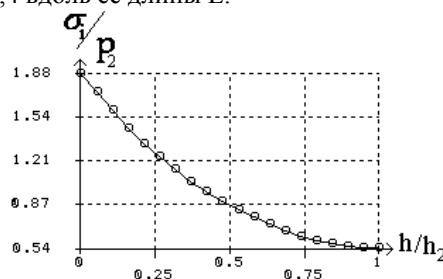


Рис. 4. Распределение интенсивностей напряжений по толщине стенки в опасном сечении

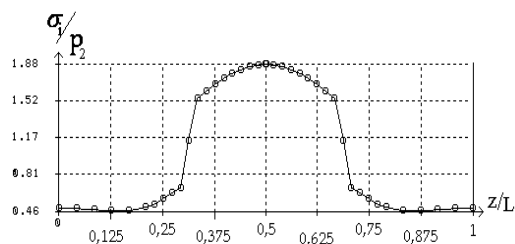


Рис. 5. Максимальные значения интенсивностей напряжений на внутренней поверхности наружного цилиндра вдоль его длины

Для обоснованного выбора размеров пресс-формы из новых материалов необходимы расчетные данные анализа ее прочности при разных отношениях внутреннего и наружного диаметров вкладыша d/d_1 , наружного цилиндра d_1/d_2 и относительной длины нагруженного участка к общей длине наружного цилиндра ℓ/L при действии радиального давления p_2 . Результаты расчетов интенсивности напряжений в наружном цилиндре приведены в таблице.

Значения σ_1/p_2 в зависимости от d_1/d_2 и ℓ/L

ℓ/L	d_1/d_2							
	0,1 5	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,1	0,9 2	0,9 7	1,0 3	1,1 2	1,3 5	1,6 9	3,3 2	9,02
0,2	1,1 1	1,1 7	1,2 4	1,4 4	1,8 8	2,3 7	4,8 5	11,04
0,3	1,2 4	1,3 2	1,4 1	1,7 0	2,2 7	2,7 8	5,3 9	10,80
0,4	1,3 3	1,4 3	1,5 5	1,8 8	2,5 4	3,0 6	5,4 7	10,31
0,5	1,4 1	1,5 2	1,6 6	2,0 2	2,7 0	3,2 7	5,3 6	10,20
0,6	1,4 8	1,6 0	1,7 6	2,1 2	2,7 7	3,3 6	5,2 2	10,14

Для наружного цилиндра с относительными размерами $d_1/d_2 = 0,6$ и $\ell/L = 0,5$ интенсивность напряжений в опасном сечении (середины нагрузки) наибольшая и по данным таблицы равна 2,7. Согласно критерию прочности Кулона–Мора [2] для хрупких материалов предельная интенсивность напряжений должна быть меньше предела прочности на растяже-

ние: $(\sigma_i)_{\max} < (\sigma_r)_B$. Для наружного цилиндра с такими относительными размерами и $(\sigma_r)_B = 110$ МПа для УУКМ предельное давление на стенку наружного цилиндра $(p_2)_{\max} = (\sigma_r)_B / 2,7 = 40,7$ МПа. Давление на стенку вкладыша больше в результате редуцирования напряжений [4]: $P_1 = P_2 \cdot \frac{d_1}{d_2}$. Для вкладыша с внутренним диаметром $d = 120$ мм и наружным $d_1 = 200$ мм давление на стенку равно $p_1 = 68$ МПа. Осевое давление на порошок с учетом коэффициента бокового давления [3] $p = p_1 / 0,3 = 226$ МПа. Это давление создаст продольная сила на пуансон $P = p \cdot 0,785d^2 = 225,5$ т. При коэффициенте запаса прочности $n_B = 2,5$, рекомендованном для хрупких материалов [2], допустимое давление на порошок $[p] = 90,5$ МПа и осевая сила $P = 102$ т. Вкладыш меняют после каждого прессования, его вынимают вместе с изделием.

4. ВЫВОДЫ

В статье дано расчетное обоснование по использованию углерод-углеродного композитного материала (УУКМ) в наружных цилиндрах пресс-форм, предназначенных для прессования изделий при удельных давлениях до 100 МПа и температурах до 1800 °С с помощью порошков тугоплавких соединений. Приведены математическая постановка и результаты расчетов задачи об упругом деформировании под внутренним давлением двухслойного толстостенного корпуса пресс-формы с внутренним цилиндром-вкладышем из графита и наружным несущим цилиндром из УУКМ с заданными относительными размерами: толстостенностью d_1/d_2 и отношением длины нагруженного участка к общей ее длине l/L .

В основу решения такой задачи положен метод конечных элементов (МКЭ) и метод решения контактной задачи по итерационной схеме метода переменных параметров упругости, хорошо зарекомендовавшим себя при решении задач упругого деформирования многослойных цилиндров. Стенка наружного цилиндра пресс-формы моделировалась телом вращения из изотропного материала, находящегося под внутренним давлением. Анализ прочности основан на МКЭ и численном решении на персональном компьютере (ПК) разрешающих уравнений

МКЭ. Приведены расчетные данные о деформировании стенки наружного цилиндра и значения максимальных интенсивностей напряжений в зависимости от внутреннего давления, толстостенности и относительной длины нагруженного участка.

По приведенным в статье расчетным данным можно обоснованно выполнять проектирование пресс-форм из УУКМ заданных размеров для прессования изделий с помощью порошков тугоплавких соединений при давлении прессования до 100 МПа и температуре до 1800 °С.

Согласно расчету для пресс-формы с внутренним диаметром вкладыша 120 мм, длиной спрессованного порошка 120 мм и относительными размерами вкладыша $d/d_1 = 0,6$; наружного цилиндра $d_1/d_2 = 0,6$ и $l/L = 0,5$ допустимое давление прессования с запасом прочности $n_B = 2,5$ и $(\sigma_r)_B = 110$ МПа $p = 90,5$ МПа при осевой силе на пуансон $P = 102$ т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Г. Бушуев, М.И. Персин, В.А. Соколов. *Углерод-углеродные композиционные материалы: Справочник*. М.: «Металлургия», 1994, 128 с.
2. Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. *Справочник по сопротивлению материалов*. Киев: «Наукова думка», 1988, 735 с.
3. А.Н. Николаев. Расчет и конструирование матриц для прессования металлических порошков // *Труды Горьковского политехнического института, металловедения и порошковой металлургии*. Т. XIX. В.1. Горький, 1963, с. 11–15.
4. Д.С. Миранский. Принцип конструирования аппаратов сверхвысокого давления. Принцип редуцирования радиального напряжения // *Прикладная механика и механическая физика*. 1960, № 2, 165–168 с.
5. С.В. Бондарь, С.С. Зубатый, Б.Н. Киркач, В.И. Лавинский. Программный комплекс SPACE-T для решения термоупругопластических контактных задач // *Динамика и прочность машин*. 2000, №57, с. 24–34.
6. *Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник* / Под ред. В.П. Семенова. М.: «Металлургия», 1975, 336 с.

АНАЛІЗ МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ПРЕС-ФОРМ З ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПСЕВДОІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ

*В.П. Ашихмін, О.В. Бірюков, В.О. Гурін, Б.Б. Затолока, В.В. Колосенко, С.Ю. Саєнко
Д.В. Лавінський, О.К. Морачковський*

Представлено методи розрахунку і результати аналізу міцності прес-форм із зовнішніми циліндрами з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів (ВВКМ), застосовуваних у ННЦ ХФТІ для пресування виробів методом псевдоізостатичного пресування під тиском до 100 МПа і температури до 1800 °С. Стінка циліндра прес-форми моделюється тілом обертання з ВВКМ під внутрішнім тиском. Аналіз міцності заснований на методи скінчених елементів (МСЕ) і чисельному рішенні на персональному комп'ютері (ПК) системи рівнянь, що розв'язують МСЕ. Приведено розрахункові дані для максимальних значень інтенсивності напружень у залежності від відношення внутрішнього діаметра стінки до зовнішнього (параметр товстостінності d_1/d_2) при різних значеннях відносини довжини навантаженої ділянки до довжини циліндра (l/L). За даними розрахунку можна проектувати прес-форми заданих розмірів.

THE STRENGTH ANALYSIS OF THE MOULDS ELEMENTS FROM CARBONEUM - CARBONIC MATERIALS FOR PSEUDO-ISOSTATIC PRESSING

*V.P. Ashihmin, O.V. Biryukov, V.A. Gurin, B.B. Zatoloka, V.V. Kolosenko, S.Yu. Sayenko
D.V. Lavinsky, O.K. Morachkovsky*

The computational methods and outcomes of the analysis of strength of the moulds elements from carboneum - carbonic composite materials (CCCM), used in NSC "«KhFTI" for pressing items by a method of pseudo-isostatic pressing under pressure up to 100 MPa and temperature up to 1800 °C are submitted. The wall of the barrel of a mould is modeled by a body of revolution from CCCM under internal pressure. The strength analysis is based on a finite element method (FEM) and numerical solution on the personal computer (PC) of a system of authorizing equations FEM. The predicted data for maximum ratings of intensity of stresses are adduced depending on relation of a minor diameter of a wall to outside (parameter thick-walled d_1/d_2) at miscellaneous values of relation of length of the loaded segment to barrel length (l/L). Under the data of calculations it is possible to engineer moulds of the given sizes.