

О.В.БИРЮКОВ, канд.техн.наук; **С.Ю.САЕНКО**, канд.техн.наук;
В.В.КОЛОСЕНКО; НЦ "ХФТИ»;
Д.В.ЛАВИНСКИЙ, канд.техн.наук; **В.Н.СОБОЛЬ**;
О.К.МОРАЧКОВСКИЙ, докт.техн.наук, НТУ «ХПИ»

СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕСС-ФОРМ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВ

Представлено метод та результати аналізу міцності двошарової товстостінної матриці й центрального стержня, що формує внутрішню поверхню виробу, прес-форм для пресування виробів з порошкових матеріалів. Аналіз міцності конструктивних елементів прес-форм виконано методом скінчених елементів (МСЕ). Приведено розрахункові дані, за якими можна здійснювати проектування прес-форм за умов забезпечення міцності їхнім конструктивним елементам.

The method and outcomes of the strength analysis of a two-layer thick-walled matrix and central core, which one reshapes an internal surface of item, moulds for pressing powdered materials are submitted. The analyses of strength of structural members of a mould by a finite element method (FEM) are executed. The predicted data on the basis of which one it is possible to execute designing elements of moulds to their structural members under strength conditions are submitted.

Актуальность проблемы. В научно-технической литературе имеются публикации по общим вопросам прочности конструктивных элементов устройств и технологиям прессования, например [1-4]. В известных устройствах для прессования изделий из порошков тугоплавких соединений используются матрицы из тугоплавких материалов, прессование производят при давлениях 30...40 МПа и температурах до 1800 °С. При больших давлениях материалы пресс-форм разрушаются. Для прессования изделий из порошков тугоплавких соединений предлагается использовать углерод-углерод композитный материал (УУКМ), предназначенный для эксплуатации при давлениях 40...100 МПа. Для обоснованного выбора размеров стенки пресс-формы из УУКМ по условиям прочности необходимы данные анализа статической прочности конструктивных элементов пресс-форм для прессования изделий из порошков тугоплавких соединений, которыми можно воспользоваться при проектировании таких устройств. Анализ прочности элементов устройства для прессования полых изделий из порошков тугоплавких соединений посвящена данная работа.

Устройство для прессования полых изделий из порошков. Конструкция устройства для прессования полых брикетов из порошков тугоплавких соединений показана на рис. 1.

Прессуемый брикет из порошка – (4) находится в объемном напряженном состоянии от торцевого давления P и бокового давления p_1 .

Устройство состоит из двухслойной пресс-формы: внутреннего вкладыша из графита – (1) и наружного цилиндра-матрицы из УУКМ – (2); центрального стержня из графита или УУКМ – (3); прессуемого брикета из порошка – (4);

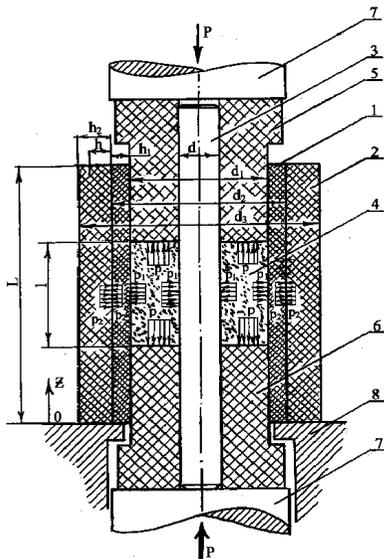


Рисунок 1 – Устройство для прессования изделий из порошков:
 1 – вкладыш; 2 – матрица; 3 – центральный стержень; 4 – брикет из порошка; 5, 6 – пуансоны; 7 – поршни пресса; 8 – несущая рама

верхнего – (5) и нижнего – (6) пуансонов Т-образной формы в продольном сечении; поршней гидравлического пресса – (7), передающих сжимающую силу P на пуансоны, несущей рамы – (8) с пресс-формой.

Вкладыш посажен плотно без зазора в наружный цилиндр и формирует наружную поверхность брикета, а его внутреннюю поверхность формирует центральный стержень.

Подготовленная к прессованию пресс-форма находится в камере с нагревателями. Прессование проводится в нейтральной среде внутреннего объема камеры при равномерном нагреве пресс-формы до ~ 1800 °С. Нагружение ведется ступенчато с фиксацией усилия и вертикального перемещения поршней. Гидравлический пресс может создать продольную силу до 150 т. После прессования вкладыш и центральный стержень из графита разрушаются, матрица из УУКМ может выдержать несколько прессований.

Метод расчета. В работе рассмотрена математическая постановка задачи для упругого деформирования под внутренним давлением двухслойных контактирующих цилиндров, напряженное состояние которых при отсутствии объемных сил определяется системой дифференциальных уравнений равновесия [1]:

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

где L_p – поверхность, на которой действует давление в пресс-форме.

В общем случае, для точек, принадлежащим контактной поверхности, условия их сопряжения отвечают неравенствам [2]:

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

где $u_n^{m-1}, u_n^{m+1}, \delta_{on}^m$ – нормальные перемещения точек поверхностей контактируемых областей и начальный натяг (зазор),

σ_m^m – нормальные напряжения на контактирующих поверхностях.

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

Механизмы контактного взаимодействия между соответствующими точками областей контактируемых поверхностей моделировались путем введения контактного слоя со специальными свойствами, количественно отвечающими механизму контакта [2]. 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 деформирующих 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 материала УУКМ.

В пределах линейной упругости материала, соотношение (3) отвечает обобщенному закону Гука. Для упруго-пластического деформирования при простом нагружении и при рассмотрении малых пластических деформаций, в соотношении (3)

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

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 упруго-пластических деформаций Ильюшина в форме переменных параметров упругости.

Далее, в расчетах использован вариационный принцип Лагранжа и конечно-элементная (КЭ) схема матрицы. Базовым КЭ принят четырех узловой изопараметрический элемент с билинейной аппроксимацией перемещений. Методика решения задач о деформировании стенки матрицы 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:

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

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^{тем}} – 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.

Результаты расчетов. Данные о физико-механических свойствах материалов элементов пресс-формы приведены в литературе [1,3,4]. Расчеты на прочность стенок матрицы выполнены при следующих данных о свойствах материала (T = 1800 °C). Первый слой – графит: предел прочности на растяжение – 15 МПа, предел прочности 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/°C. Второй слой – УУКМ: 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/°C. Данные расчетов напряженно-деформированного состояния матрицы приведены в табл. 1, 2, и на рис. 2-3.

Таблица 1 – Расчетные значения: интенсивности напряжений σ_i/p_1 и продольных σ_z/p_1 во вкладыше в зависимости от d_1/d_2 , d_2/d_3 и l/L

l/L	σ_i/p_1 при $d_1/d_2, d_2/d_3$				σ_z/p_1 при $d_1/d_2, d_2/d_3$			
	0,919	0,787	0,850	0,851	0,919	0,787	0,850	0,851
0,250	2,15		2,26		-1,28		-1,27	
0,315	2,44		2,56		-1,32		-1,31 (1,34)	
0,395	2,72		2,86		-1,3 (1,32)		-1,29 (1,37)	
0,470	2,91		3,06		- 1,22 (1,29)		-1,2 (1,4)	
0,550	3,05		3,20		-1,24 (1,59)		-1,24 (1,5)	

Таблица 2 – Расчетные значения интенсивности напряжений σ_i/p_1 , продольных напряжений σ_z/p_1 в матрице при давлении порошка на вкладыш p_1 в зависимости от d_1/d_2 , d_2/d_3 и l/L

l/L	σ_i/p_1 при d_1/d_2 и d_2/d_3				σ_z/p_1 при d_1/d_2 и d_2/d_3			
	0,918	0,787	0,850	0,851	0,918	0,787	0,850	0,851
0,25	1,92		1,67		1,50		1,60	
0,315	2,22		1,94		1,65		1,72	
0,395	2,52		2,22		1,70		1,74	
0,470	2,74		2,44		1,65		1,68	
0,550	2,90		2,61		1,59		1,61	

Расчетные значения интенсивности напряжений σ_i/p_1 и продольных напряжений σ_z/p_1 в матрице от давления порошка p_1 на стенку вкладыша и радиального давления p_2 на матрицы, в зависимости от толстостенности вкладыша

d_1/d_2 , матрицы d_2/d_3 и длины нагруженного участка l/L для $d_1 = 340\text{мм}$, $d_3 = 470\text{мм}$, $L = 380\text{мм}$, приведены в табл. 2.

Выводы. В статье дано обоснование в использовании нового углерод - углеродного композита (УУКМ) в матрицах пресс-форм, предназначенных для прессования изделий из порошка при предельных давлениях, уровни которых превышают традиционные (до 100 МПа). Анализ прочности основан на методе конечных элементов (МКЭ). Приведены расчетные значения максимальных интенсивностей напряжений в зависимости от параметра толсто-стенности – d_1/d_2 при разных значениях отношения длины нагруженного участка к общей длине матрицы (l/H). По этим данным можно обоснованно выполнить проектирование пресс-форм для прессования тугоплавких соединений при высоких температурах ($\approx 18000\text{ С}$) под давлением ($p \approx 100\text{ МПа}$).

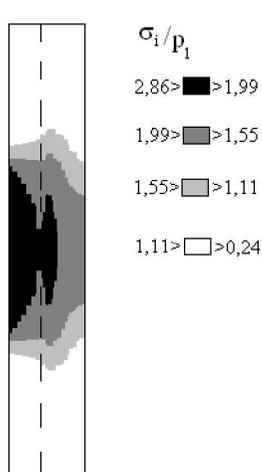


Рисунок 2 – распределение интенсивности напряжений в стенке матрицы при $d_1/d_2 = 0,85$, $d_2/d_3 = 0,851$

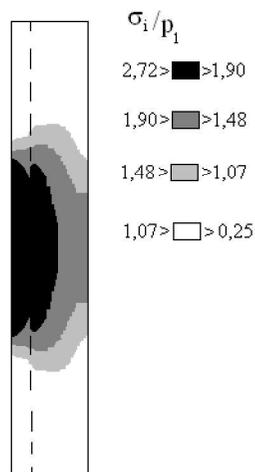


Рисунок 3 – распределение интенсивности напряжений в стенке матрицы при $d_1/d_2 = 0,919$, $d_2/d_3 = 0,787$

Список литературы: 1. Свойства конструкционных материалов на основе углерода // Справочник под ред. В.П. Седова. – М. «Металлургия», 1975. – 336 с. 2. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: «Наукова думка», 1988. – 735 с. 3. Николаев А.Н. Расчет и конструирование матриц для прессования металлических порошков // Труды горьковского политехнического института, металлургии и порошковой металлургии. – Т. XIX, вып. 1. – Горький. – 1963. – С. 11-15. 4. Миранский Д.С. Принцип конструирования аппаратов сверхвысокого давления. Принцип редуцирования радиального напряжения // Прикладная механика и механическая физика. – Москва. – № 2. – 1960. – С. 165-168.

Поступила в редколлегию 19.07.2006