

**О.В.БИРЮКОВ**, канд.техн.наук; **С.Ю.САЕНКО**, канд.техн.наук;  
**В.В.КОЛОСЕНКО**, канд.техн.наук; Институт физики твердого тела,  
материаловедения и технологий ННЦ «ХФТИ», Харьков;  
**Е.И.КОРНИЛОВ**, канд.техн.наук; **О.Ф.КОВПИК**, канд.техн.наук;  
Институт плазменной технологии и новых методов ускорения ННЦ  
«ХФТИ», Харьков; **О.К.МОРАЧКОВСКИЙ**, докт.техн.наук;  
**Д.В.ЛАВИНСКИЙ**, канд.техн.наук; Национальный технический  
университет «ХПИ», Харьков

## **РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ТРУБЧАТОЙ СТЕНКИ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ**

Представлено метод і результати розрахунку на міцність і жорсткість трубчастої стінки з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу (ВВКМ), застосовуваного в ННЦ «ХФТИ» для вакуумних об'єктів. Стінка з жорстко закріпленими холодними краями розділяє вакуумний обсяг камери й атмосферу, і пручи-знаходячи вигнуту форму деформується в умовах високих температур (250<sup>0</sup>С) під внутрішнім тиском. Аналіз міцності заснований на методі скінчених елементів (МСЕ) і чисельному розв'язку на персональному комп'ютері (ПК) системи розв'язних рівнянь МСЕ. Наведено розрахункові дані для вигнутої форми стінки й максимальні значення інтенсивності напруг. Дано оцінки міцності й твердості трубчастої стінки.

The method and results of calculation on durability and rigidity of a tubular wall from carbon-carbon of a composite material (CCCM) used in NSC «KhFTI» for vacuum objects are presented. The wall with rigidly fixed cold edges divides vacuum volume of the chamber and an atmosphere, and getting bending form is deformed in conditions of heats (250<sup>0</sup>C) under internal pressure. The analysis of durability is based on a method of finite elements (FEM) and the numerical decision on a personal computer of system of resolving equations FEM. Settlement data for bending form of a wall and the maximal values of intensity of stress. Estimations of durability and rigidity of a tubular wall are given.

### **Введение**

Исследуемое Устройство представляет собой цилиндрическую кольцевую вакуумную камеру с внутренней тонкостенной трубкой из углерод-углеродного композитного материала (УУКМ) вакуумной плотности.

Трубка, которую можно считать тонкой цилиндрической оболочкой. Для технологических целей стенка нагревается потоком горячего воздуха до температуры 250 °С. Торцы трубки закреплены в холодном корпусе вакуумной камеры с помощью кольцевых торцовых фланцев, которые сжимают кольцевые вакуумные уплотнители из резины и создают необходимое давление уплотнения, и, таким образом, надежно удерживают стенку в корпусе камеры.

Цилиндрическая оболочка-стенка имеет постоянную толщину и находится под действием осесимметричной нагрузки и нагрева. Стенка жестко закреплена по торцам в холодном корпусе камеры.

Материал стенки – УУКМ вакуумной плотности имеет высокую механическую плотность и химическую стойкость при высоких температурах.

Разработаны конструкции Устройства и стенки, проведены расчеты на прочность в заданных технологических условиях.

### 1 Конструкция Устройства вакуумной камеры с трубчатой стенкой

На рис. 1 показано Устройство – цилиндрическая вакуумная камера – 1 с тонкой трубчатой стенкой – 2 из УУКМ вакуумной плотности. Эта стенка разделяет вакуумный объем – кольцевую цилиндрическую камеру – 1 и атмосферу. Стенка – 2 с помощью кольцевых торцовых фланцев – 3 прижата к торцовым фланцам корпуса с двух сторон. Уплотнение на вакуум осуществляется с помощью кольцевых уплотнителей из резины – 4. Для получения необходимой вакуумной плотности резина прижата осевыми выступами торцовых фланцев – 3 к стенкам корпуса вакуумной камеры – 1. За счет уменьшения осевого сжатия увеличивается нормальное радиальное давление  $p_r$  на стенку – 2.

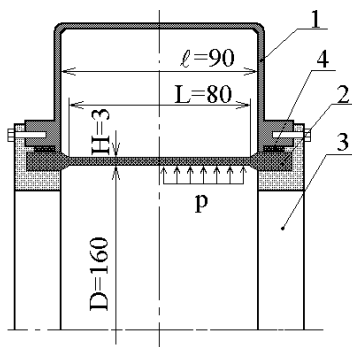


Рисунок 1 – Цилиндрическая вакуумная камера с трубчатой стенкой из УУКМ  
1 – трубчатая стенка из УУКМ; 2 – корпус вакуумной камеры (металл);  
3 – торцовый опорный уплотнитель (металл); 4 – уплотнитель на вакуум (резина)

На внутренней поверхности стенки – 2 действует нормальное радиальное давление горячего воздуха  $p_a = 10^5$  Па. При этом стенка – 2 нагрета до необходимой технологической температуры  $t_c = 250$  °С. На наружной поверхности стенки – 2 давление отсутствует  $p_0 = 0$ . В рабочем состоянии в стенке возникают механические и температурные напряжения.

На рис. 2 показана расчетная схема тонкой трубчатой стенки – 2 вакуумной камеры – 1. Стенка – 2 имеет толщину  $H = 3$  мм, диаметр  $D = 2a = 160$  мм, длину  $l = 90$  мм. Она жестко закреплена в торцовых фланцах холодного корпуса камеры – 1.

### 2 Расчетная модель трубчатой стенки

Для расчетов на прочность и жесткость использована математическая постановка задачи для упругого деформирования тонкостенного цилиндра при действии на него равномерного внутреннего радиального давления. Геометрия стенки и особенности нагружения позволяют рассматривать задачу в осесимметричной постановке. Напряженно-деформированное состояние (НДС) мат-

рицы, 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.

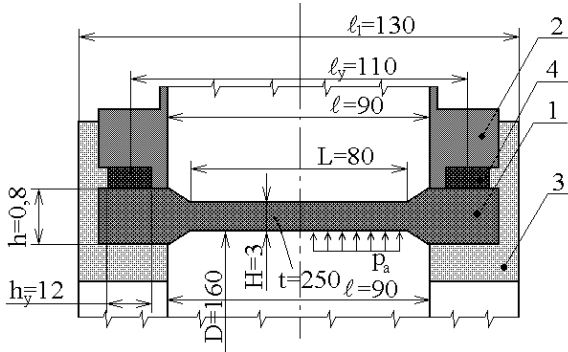


Рисунок 2 – Схема трубчатой стенки вакуумной камеры  
1 – стенка из УУКМ; 2 – опорный фланец вакуумной камеры (металл); 3 – торцовый опорный кольцевой фланец (металл); 4 – уплотнитель на вакуум (резина)

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  $A_{ijkl}$ ,  $\alpha_{ij}$  – 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 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  $E_*$ ,  $\nu_*$  – переменные параметры упругости, которые определяются связью между интенсивностями напряжений  $\sigma_i$  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 стенки (рис. 3). Базовым КЭ принят четырех узловой изопараметрический элемент с билинейной аппроксимацией перемещений.

Методика решения задач о деформировании стенки принята отвечающей

единой итерационной схеме. С этой целью в расчетах принято пошаговое при-  
ложение давления, с итерационной схемой поиска неизвестных узловых пере-  
мещений, аналогичной методике переменных параметров упругости для реше-  
ния задач упруго-пластического деформирования. На каждом шаге линейризо-  
ванная система уравнений МКЭ имела вид:

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

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,  $\{F^{mem}\}$  – вектор температурных нагрузок, при-  
веденных к узлам КЭ сетки.

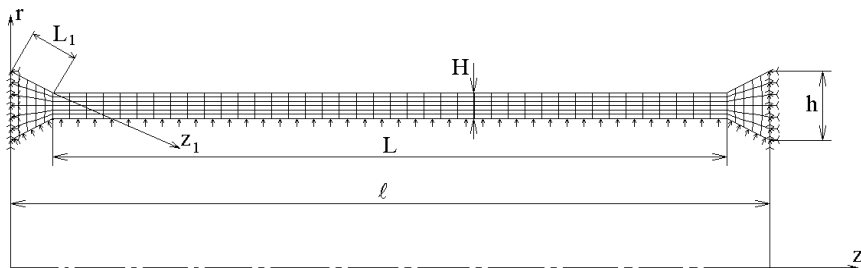


Рисунок 3 – КЭ схема стенки

Предложенный метод реализован в программном модуле для программ-  
ного комплекса SPACE-T [5].

### 3 Результаты расчетов на прочность матрицы

Расчеты на прочность стенок вкладыша и матрицы выполнены при сле-  
дующих данных о свойствах материала УУКМ [1]. Предел прочности на рас-  
тяжение 110 МПа; предел прочности на сжатие 100 МПа; модуль упругости  $1,8 \cdot 10^4$  МПа; коэффициент Пуассона 0,19; коэффициент температурного рас-  
ширения  $-3,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

Данные расчетов напряженно-деформированного состояния матрицы  
приведены на рис. 4-5.

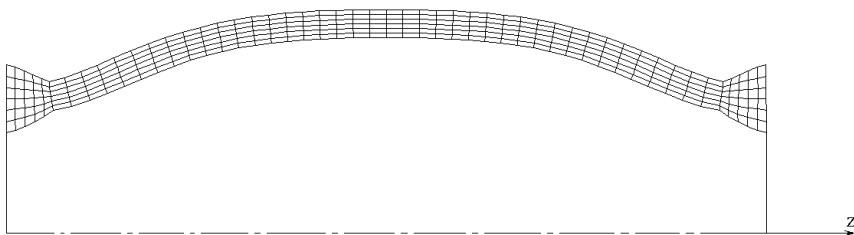


Рисунок 4 – Деформированная форма стенки

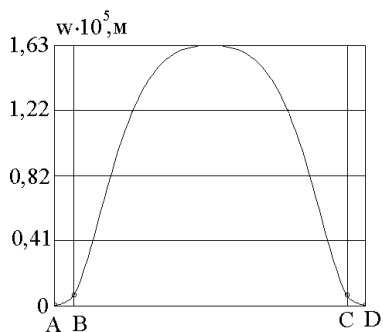


Рисунок 5 – Распределение прогибов в точках наружной поверхности стенки

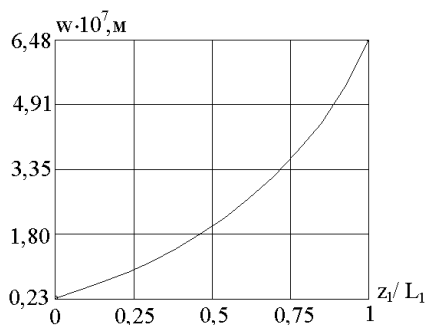


Рисунок 6 – Распределение прогиба в точках наружной поверхности стенки на участке переменной толщины

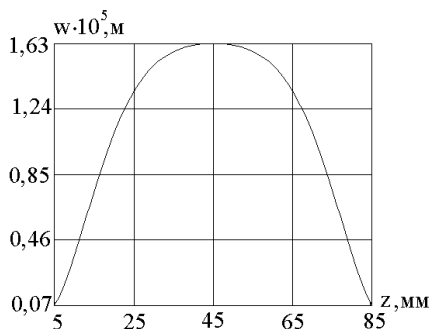


Рисунок 7 – Распределение прогиба в точках наружной поверхности стенки на участке постоянной толщины

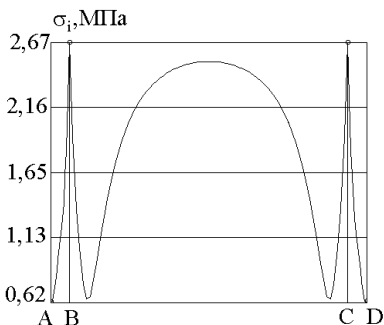


Рисунок 8 – Распределение интенсивности напряжений в точках наружной поверхности холодной стенки

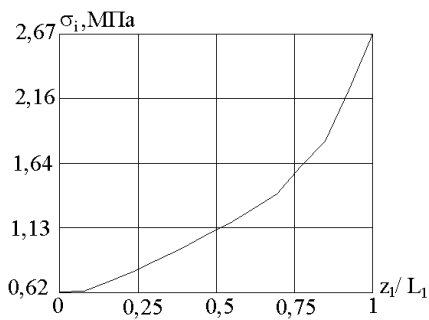


Рисунок 9 – Распределение интенсивности напряжений в точках наружной поверхности холодной стенки на участке переменной толщины

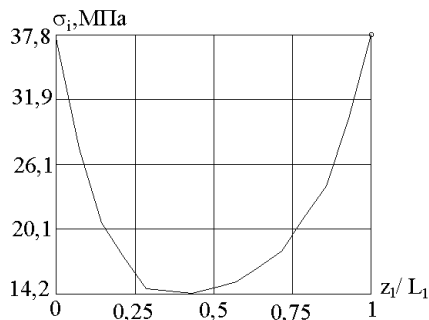


Рисунок 10 – Деформированная форма стенки

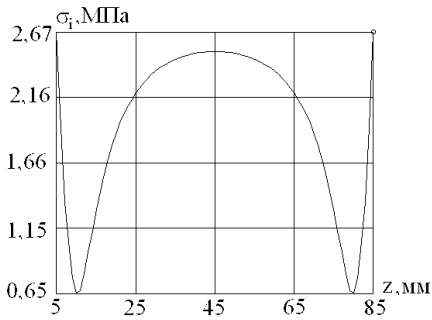


Рисунок 11 – Деформированная форма стенки

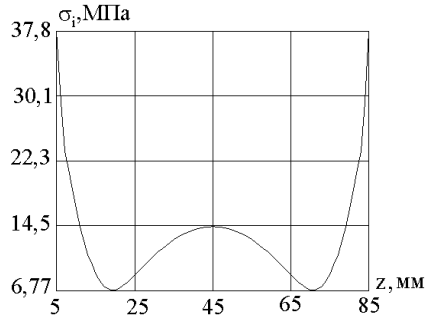


Рисунок 12 – Деформированная форма стенки

### Выводы

В статье дано расчетное обоснование использования углерод-углеродного композитного материала (УУКМ) в матрицах прессформ для прессования изделий с помощью порошков тугоплавких соединений при удельных давлениях до 100 МПа и температурах до 1800°C. Приведена математическая постановка задачи об упругом деформировании под внутренним давлением двухслойного толстостенного корпуса прессформы с внутренним цилиндром-вкладышем из графита и наружным несущим цилиндром-матрицей из УУКМ с заданными относительными размерами матрицы: толстостенностью  $d_1/d_2$  и отношением длины нагруженного участка к общей ее длине  $\ell/L$ .

В основу решения 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 матрицы прессформы 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 матрицы 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 прессформ из УУКМ заданных размеров для прессования изделий с помощью порошков тугоплавких соединений при давлении прессования до 100 МПа и температуре до 1800°C.

Согласно расчету для прессформы с внутренним диаметром вкладыша  $d = 120$  мм, длиной спрессованного порошка  $\ell = 120$  мм и относительными размерами вкладыша  $d/d_1 = 0,6$ ; матрицей  $d_1/d_2 = 0,6$  и  $\ell/L = 0,5$  допустимое давление прессования с запасом прочности  $n_B = 2,5$  и  $(\sigma_+)_{B} = 110$  МПа;  $p = 90,5$  МПа при осевой силе на пуансон  $P = 102$  т.

**Список литературы:** 1. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев, Наукова думка, 1988. – 735 с. 2. Николаев А.Н. 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. 3. Д.С.Миранский Принцип конструирования аппаратов сверхвысокого давления. Принцип редуцирования радиального напряжения // Прикладная механика и механическая физика. – № 2. – Москва, 1960. – 168 с. 4. Ю.Г.Буцуев, М.И.Персин, В.А.Соколов Углерод-углеродные композиционные материалы. Справочник. – М.: Металлургия, 1994. – 128 с. 5. Бондарь С.В., Зубатый С.С., Киркач Б.Н., Лавинский В.И. 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. Седова. – М.: Металлургия, 1975. – 336 с.

*Поступила в редколлегию 03.11.2008*

УДК 621.039.55: 539.3

**О.В.БИРЮКОВ**, канд.техн.наук; **С.Ю.САЕНКО**, канд.техн.наук;  
**В.В.КОЛОСЕНКО**, канд.техн.наук; Институт физики твердого тела,  
металловедения и технологий ННЦ «ХФТИ», Харьков;  
**Е.И.КОРНИЛОВ**, канд.техн.наук; **О.Ф.КОВПИК**, канд.техн.наук;  
Институт плазменной технологии и новых методов ускорения ННЦ  
«ХФТИ», Харьков; **О.К.МОРАЧКОВСКИЙ**, докт.техн.наук;  
**Ю.В.РОМАШОВ**, канд.техн.наук; НГУ «ХПИ», Харьков

## **ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ПЛОСКОЙ СТЕНКИ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВЫВОДА ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ**

Представлено метод і результати розрахунку на міцність і твердість трубчастої стінки з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу (ВВКМ), застосовуваного в ННЦ «ХФТИ» для вакуумних об'єктів. Стінка з жорстко закріпленими холодними краями розділяє вакуумний об'єм камери й атмосферу, і пручи-знаходячи вигнуту форму деформується в умовах високих температур (250 °С) під внутрішнім тиском. Аналіз міцності заснований на методі скінченних елементів (МСЕ) і чисельному рішенні на персональному комп'ютері (ПК) системи розв'язних рівнянь МСЕ. Наведено розрахункові дані для вигнутої форми стінки й максимальні значення інтенсивності напруг. Дано оцінки міцності й твердості трубчастої стінки.

The method and results of calculation on durability and rigidity of a tubular wall from carbon-carbon of a composite material (CCSM) used in NSC «KhFTI» for vacuum objects are presented. The wall with rigidly fixed cold edges divides vacuum volume of the chamber and an atmosphere, and getting bending form is deformed in conditions of heats (250<sup>0</sup>C) under internal pressure. The analysis of durability is based on a method of finite elements (FEM) and the numerical decision on a personal computer of system of resolving equations FEM. Settlement data for bending form of a wall and the maximal values of intensity of stress. Estimations of durability and rigidity of a tubular wall are given.

**Формулировка проблемы.** Окно вывода потока заряженных частиц из вакуумного объема в рабочую среду ускорителя предназначено для герметиза-