

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,  
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;  
**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**

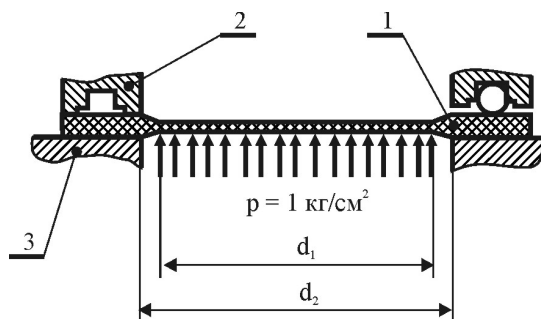
Представлено метод і результати розрахунку на міцність і твердість трубчастої стінки з вуглець-вуглецевого композитного матеріалу (ВВКМ), застосовуваного в ННЦ «ХФТИ» для вакуумних об'єктів. Стінка з жорстко закріпленими холодними краями розділяє вакуумний обсяг камери й атмосферу, і пручи-знаходячи 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-

ции вакуумного объема, его физического отделения от рабочей среды, и пропускания заряженных частиц из вакуумного объема в рабочую среду. Проблемы при проектировании окна вывода потока заряженных частиц порождаются противоречивостью требования отделения вакуумного объема ускорителя от рабочей среды и требования пропускания заряженных частиц из вакуумного объема в рабочую среду.

Известные конструкции окон для вывода заряженных частиц имеют разграничивающие стенки, которые отделяют вакуумный объем от рабочей среды и через которые пропускаются заряженные частицы, в виде фольги или тонких пластин, выполненных из легких металлов – титана или алюминия и охлаждаемых струей воздуха или другого газа [1]. Такие стенки для обеспечения прозрачности потокам заряженных частиц выполняют толщиной порядка  $15\div 100$  мкм; требования прочности ограничивают размеры таких стенок шириной  $40\div 80$  мм и длиной более 1000 мм. Описанные конструкции обладают множеством недостатков. Прохождение потока зараженных частиц вызывает аномальное окисление и охрупчивание материала стенки, вызывает сильный нагрев стенки, которые приводит к сильному изменению ее формы и появлению температурных напряжений. Кроме этого, при выпуске пучка заряженных частиц через узкую полосу фольги требуется его развертка в двух направлениях – вдоль длинной и вдоль короткой сторон полосы.



1 – разграничивающая стенка; 2 – фланцы корпуса вакуумной камеры;  
3 – прижимное кольцо

Рисунок 1 – Окно вывода ускорителя

Использование для изготовления разграничивающей стенки углерод-углеродного композитного материала (УУКМ) [2, 3] вместо металлов позволяет существенно улучшить конструктивные и эксплуатационные характеристики окна вывода потока заряженных частиц из вакуумного объема ускорителя. Материал УУКМ достаточно прозрачен для потока заряженных частиц и имеет при этом высокие прочностные характеристики и низкий коэффициент теплового расширения. Свойства материала УУКМ позволяют выполнять разграничивающие стенки в виде круглых пластин достаточно большого радиуса, что требует развертку потока заряженных частиц только по радиусу и существенно упрощает конструкцию ускорителя. Конструкция (рис. 1) окна вывода потока

заряженных частиц из вакуумного объема ускорителя с разграничивающей стенкой из материала УУКМ обеспечивает герметичность вакуумного объема ускорителя от внешней среды – атмосферы, а также вывод заряженных частиц из вакуумного объема ускорителя во внешнюю среду. Разграничивающая стенка 1, выполненная из УУКМ, закреплена на фланцах корпуса вакуумной камеры 2 при помощи прижимного кольца 3.

Уплотнение на вакуум обеспечивается резиновым уплотнительным кольцом: слева на рис. 1 показан уплотнитель в рабочем состоянии, а справа – перед сборкой. Поток заряженных частиц проходит через тонкую рабочую плоскость разграничивающей стенки, имеющую диаметр  $d_1$  и толщину  $h_1$ . Для закрепления стенки в корпусе вакуумной камеры и обеспечения рабочей поверхности резинового уплотнителя часть стенки имеет толщину  $h_2 > h_1$ .

**1 Математическая постановка задачи.** Расчет разграничивающей стенки на прочность и жесткость требует анализа при эксплуатационных нагрузках ее напряженно-деформированного состояния. Поскольку толщина разграничивающей стенки намного меньше ее радиуса, рассматриваем разграничивающую стенку в рамках классической теории изгиба [4] тонких круглых пластин; положение точек пластины относим к цилиндрическим координатам  $r, \theta, z$  (рис. 2). Из-за существенно более низкой твердости резинового уплотнительного кольца не рассматриваем вопросы, связанные с контактным взаимодействием стенки с уплотнителем и сосредотачиваем внимание на прочности и жесткости стенки при осесимметричном изгибе давлением рабочей среды и, в общем случае, неравномерном по толщине, нагреве:

$$T(z) = (T_{B.O.} - T_{P.C.}) \frac{z}{h} + \frac{T_{B.O.} + T_{P.C.}}{2}, \quad (1.1)$$

где  $T_{B.O.}, T_{P.C.}$  – температуры вакуумного объема и рабочей среды.

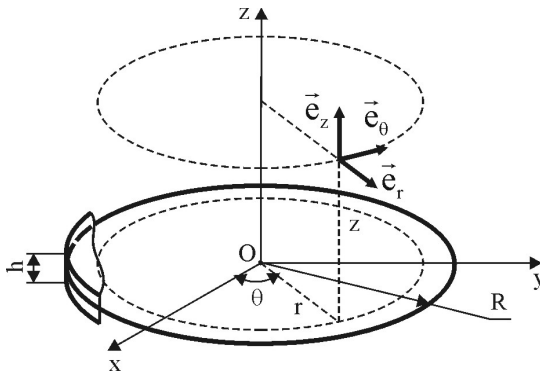


Рисунок 2 – Срединная плоскость пластины

Искомыми неизвестными оставляем внутренние силы  $Q_{rr}, Q_{\theta\theta}, Q_{rz}$ , моменты  $M_{rr}, M_{\theta\theta}$ , перемещения  $u, w$  и угол поворота  $\kappa_r$ :

$$\begin{aligned} \frac{1}{Eh} Q_{rr} - \frac{\nu}{Eh} Q_{\theta\theta} - \frac{du}{dr} &= -O_T; -\frac{\nu}{Eh} Q_{rr} + \frac{1}{Eh} Q_{\theta\theta} - \frac{u}{r} = -O_T; \\ \frac{12}{Eh^3} M_{rr} - \frac{12\nu}{Eh^3} M_{\theta\theta} - \frac{d\kappa_r}{dr} &= -D_T; -\frac{12\nu}{Eh^3} M_{rr} + \frac{12}{Eh^3} M_{\theta\theta} - \frac{\kappa_r}{r} = -D_T; \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\kappa_r + \frac{dw}{dr} = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{rr}}{dr} + \frac{Q_{rr}}{r} - \frac{Q_{\theta\theta}}{r} = 0; \frac{dM_{rr}}{dr} + \frac{M_{rr}}{r} - \frac{M_{\theta\theta}}{r} + Q_{rz} = 0; \frac{dQ_{rz}}{dr} + \frac{Q_{rz}}{r} + p = 0. \\ w|_{r=d_1/2} = 0; \kappa_r|_{r=d_1/2} = 0. \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $E, \nu E, \nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала пластины;  $h = h(r)$  – толщина пластины;  $O_T, D_T$  – приведенные температурные деформации:

$$O_T = -\frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \alpha(T - T_0) dz; \quad D_T = -\frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \alpha(T - T_0) z dz;$$

$\alpha$  – коэффициент теплового расширения;  $T_0$  – температура, от которой отсчитывается тепловое расширение.

**2 Метод решения задачи.** Попытки рассматривать с единообразных позиций решения краевых задач, описывающих напряженно-деформируемое состояние разнообразных элементов конструкций, естественно приводят к его обобщениям метода Бунова-Галеркина [5]. Рассмотрим общие подходы к решению задач расчета на прочность и жесткость разграничивающей стенки. Для этого представим задачу (1.2), (1.3) в операторной форме:

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad \forall \mathbf{x} \in \Gamma; \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{u}_B \quad \forall \mathbf{x} \in \partial\Gamma, \quad (2.1)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор, составленный из пространственных координат точек области  $\Gamma$ ;  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{f}$  – матричный оператор и вектор, отвечающий дифференциальным уравнениям задачи,  $\mathbf{u}$  – вектор, составленный из неизвестных задачи;  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{u}_B$  – матричный оператор и вектор, отвечающие граничным условиям задачи.

Представим искомое решение в виде аппроксимации:  $\mathbf{u} \approx \mathbf{u}_n$  по некоторой системе  $n$  пробных функций, в соответствие с методом Бубнова-Галеркина, тождественно удовлетворяя граничным условиям. Продолжая идею работы [6], представим такие аппроксимации в операторной форме:

$$\mathbf{u}_n(\mathbf{x}) = \mathbf{u}_{\partial\Gamma}(\mathbf{x}, \mathbf{u}_B) + \Phi_n(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{a}_n, \quad (2.2)$$

где  $\mathbf{u}_{\partial\Gamma}$  – вектор, продлевающий граничные значения внутрь области и выбираемый произвольным образом, чтобы выполнялось условие  $\mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_{\partial\Gamma} = \mathbf{u}_B$ ;  $\Phi_n$  – матрица, составленная из произвольных пробных функций, выбираемых, чтобы  $\mathbf{B} \cdot (\Phi_n \cdot \mathbf{a}_n) \equiv \mathbf{0}$ ;  $\mathbf{a}_n$  – вектор искомых коэффициентов аппроксимации.

Известные трудности [5] построения вектора  $\mathbf{u}_{\partial\Gamma}$  и пробных функций  $\Phi_n$  для областей сложной формы можно преодолеть при помощи разработанных акад. Рвачевым В.Л. методов аналитического описания геометрических объек-

тов на основе созданных им R-функций [7]. Подставив, аппроксимации (2.2) в дифференциальное уравнение (2.1), получаем невязку выполнения этого уравнения, и, следуя методу Бубнова-Галеркина, потребуем ортогональность в исследуемой области невязки к пробным функциям. Когда оператор  $\mathbf{L}$  – линейный, что выполняется в задаче расчета разграничивающей стенки, для определения коэффициентов аппроксимаций получаем систему линейных алгебраических уравнений [8]:

$$\mathbf{L}_n \cdot \mathbf{a}_n = \mathbf{f}_n. \quad (2.3)$$

$$\text{где } \mathbf{L}_n = \int_{\Gamma} (\Phi_n^T \cdot \mathbf{L} \cdot \Phi_n) d\Gamma, \quad \mathbf{f}_n = \int_{\Gamma} \Phi_n^T \cdot (\mathbf{f} - \mathbf{L} \cdot \mathbf{u}_{\partial\Gamma}) d\Gamma.$$

Практическим преимуществом метода Бубнова-Галеркина является возможность записи алгоритмов вычислений в терминах матричных операций, легко реализуемых на ЭВМ.

**3 Расчеты на прочность разграничивающей стенки.** Расчеты на прочность разграничивающей стенки изготовленной из УУКМ, выполним при следующих исходных данных:

$$\left. \begin{aligned} d_1 = 70 \text{ мм}; \quad h_1 = 2 \text{ мм}; \quad E = 7,1 \cdot 10^{10} \text{ Па}; \quad \nu = 0,12; \quad \alpha = 4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}; \\ p = 98100 \text{ Па}. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

В качестве координатных последовательностей используем полиномы Чебышева [9].

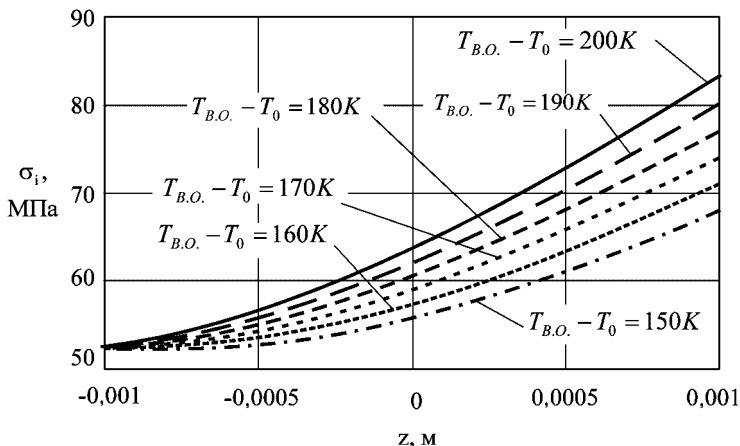


Рисунок 3 – Интенсивность напряжений в опасном сечении  $r = R$  при  $T_{P.C.} - T_0 = 200 \text{ К}$

Существенное различие в пределах прочности на растяжение  $\sigma_{B+} = 44$  МПа и сжатие  $\sigma_{B-} = 148$  МПа, характерное для материала УУКМ, требует для оценки статической прочности анализировать характер напряженного состояния в опасном сечении. Так при равномерном распределении температуры по толщине (когда температура  $T_{B.O.} = T_{P.C.}$ ) интенсивность напряжений в опасном

сечении  $r = R$  при нагреве до температуры  $T - T_0 > 100$  К оказывается выше предела прочности на растяжение, оставаясь ниже предела прочности на сжатие вплоть до эксплуатационной температуры  $T - T_0 \approx 200$  К. Только установленное в опасном сечении всестороннее сжатие позволило сделать положительное заключение о статической прочности.

Расчеты при фиксированной температуре  $T_{B.O.} - T_0 \approx 200$  К показали, что неравномерный по толщине разграничивающей стенки нагрев, характеризуемый условием  $0 < T_{B.O.} - T_{P.C.} < 50$  К, существенно не влияет на оценки статической прочности, но делает пластину более неравнопрочной, поскольку приводит к снижению минимального значения интенсивности напряжений. Расчеты, отвечающие температуре  $T_{P.C.} - T_0 \approx 200$  К при неравномерном нагреве  $T_{B.O.} \leq T_{P.C.}$ , показали, что охлаждение вакуумного объема снижает приблизительно на 5 % максимальное значение интенсивности напряжений по сравнению с равномерно нагретой по толщине разграничивающей стенкой. Некоторые результаты таких расчетов представлены на рис. 3.

**Выводы и рекомендации.** Промышленное использование интенсивных пучков заряженных частиц для обработки материалов требует разработки соответствующего технологического оборудования. Технические характеристики такого оборудования в настоящее время ограничиваются в основном конструкцией окна вывода заряженных частиц из вакуумного объема ускорителя к обрабатываемому материалу. Сложность конструирования таких окон связана с отсутствием методик расчетного обоснования их конструктивных параметров и прогнозирования их эксплуатационных показателей, в первую очередь прочности. Представленные результаты позволяют сделать выводы:

- 1 Для оценки статической прочности разграничивающей стенки для окна вывода ускорителя электронов предложена математическая модель, учитывающая изгиб стенки давлением рабочей среды ее в общем случае неравномерный по толщине нагрев.
- 2 На основе метода Бубнова-Галеркина разработаны общие подходы к приближенному анализу напряженно-деформированного состояния разграничивающей стенки. Преимуществом разработанных подходов перед распространенными подходами, основанными на вариационном принципе Лагранжа, является возможность независимого определения параметров как деформированного, так и напряженного состояния, что повышает точность определения последнего.
- 3 На основе разработанных подходов выполнены расчеты на прочность изготовленной из УУКМ разграничивающей стенки для окна вывода потока заряженных частиц из вакуумного объема в рабочую среду. Показано, что температура является основным, лимитирующим прочностные свойства фактором, и что условия прочности выполняются для эксплуатационных температур с большим запасом.

**Список литературы:** 1. Абрамян Е.А., Кулешов Г.Д. Интенсивные электронные пучки. Физика, техника, применение. – М.Ж Энергоиздат, 1984. – 230 с. 2. Конкин А.А. и др. Углеродные и другие

жаростойкие волокнистые материалы. – М.: Химия, 1974. – 375 с. **3. Бушнев Ю.Г. и др.** Углерод-углеродные композитные материалы: Справочник. – М.: Металлургия, 1994. – 128 с. **4. Бидерман В.Л.** Механика тонкостенных конструкций. Статика. – М.: Машиностроение, 1977. – 488 с. **5. Флетчер К.** Численные методы на основе метода Галеркина. Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 352 с. **6. Михлин С.Г.** Вариационные методы в математической физике. – М.: Наука, 1970. – 542 с. **7. Рвачев В.Л.** Теория R-функций и некоторые ее приложения. – К.: Наукова думка, 1982. – 566 с. **8. Ромашов Ю.В.** Метод Бубнова-Галеркина в задачах ползучести осесимметрично нагруженных круглых пластин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 4/3 (29). – С. 43-45. **9. Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров): Пер. с англ. – М.: Наука, 1977. – 832 с.

*Поступила в редколлегию 01.09.2008*