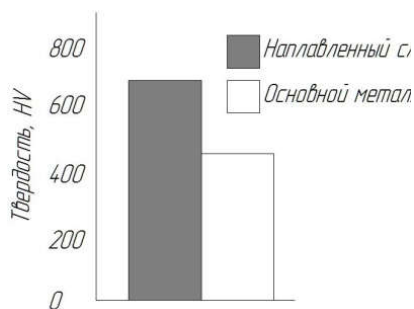
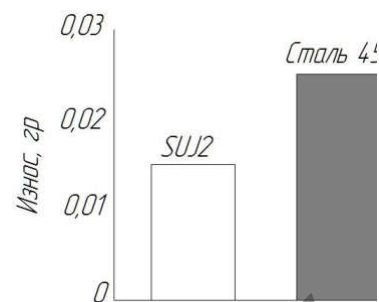


а)



б)



в)

- а – микроструктура износостойкого покрытия;  
 б – твердость покрытия и основы после наплавки ТВЧ;  
 в – интенсивность износа покрытия из ДЛ сплава

Рисунок 2 – Микроструктура, твердость и износостойкость покрытия из ДЛ стружки SUJ2

Средняя интенсивность изнашивания защитных покрытий, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания из диффузионно-легированной стружки SUJ2 в 2,5–3 раза ниже, чем у стали 45 подвергнутой предварительно закалке с низким отпуском.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них / Ф.И. Пантелеенко. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
2. Константинов, В.М. Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.М. Константинов. – Минск, 2008. – 475 л.
3. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.
4. Щербаков, В. Г. Некоторые аспекты использования отходов металлургического производства в качестве основы для получения наплавочных материалов / В. Г. Щербаков // Металлургия : республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск : БНТУ, 2011. – Вып. 33, ч. 2. – С. 200-213.
5. Щербаков, В.Г. Получение диффузионно-легированных сплавов в подвижных порошковых средах из металлических отходов производства для индукционной наплавки и пути повышения их технологических свойств / В.Г. Щербаков // Литейные процессы. – 2014. – №13. – С. 90–98.

УДК 539.3

### ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ТЕРМОСИЛОВОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КОРОТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

*В.М. Хвиевич, А.И. Веремейчик, В.В. Гарбачевский*

Брестский государственный технический университет,  
 Брест, Республика Беларусь

Воздействие температурного поля при одновременном интенсивном облучении высокоэнергетическими частицами приводит к появлению деформаций

термического расширения и окружающих деформаций радиационного распухания. При этом появляются значительные напряжения, которые могут привести к разрушению нагруженного тела. Это требует разработки новых методов расчета конструктивных элементов, подверженных воздействию одновременной терморadiационной и механической нагрузки.

Объектом рассмотрения является сплошной короткий однородный цилиндр радиусом  $R$  и высотой  $H$ , который подвергается воздействию радиационной, температурной нагрузки и внешнего радиального и осевого давления.

В связи со спецификой заданных нагрузок и с учетом физической и геометрической симметрии напряженно-деформированного состояния (НДС) короткого цилиндра можно оценить, реализовав осесимметричную задачу теории упругости с учетом теплового и радиационного воздействия. Задача рассматривается в несвязанной постановке.

Дифференциальные уравнения (ДУ) равновесия имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} = 0, \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  - радиальное, окружное и осевое напряжение,  $r$  - переменный радиус.

Граничные условия задачи:

$$\text{при } r = 0: u_r = 0, \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0, \quad \text{при } r = R: \sigma_r = -P_1, \tau_{rz} = 0,$$

$$\text{при } z = 0: u_z = 0, \tau_{rz} = 0, \quad \text{при } z = H: \sigma_z = -P_2, \tau_{rz} = 0,$$

где  $P_1, P_2$  - внешнее давление на боковой и торцевой поверхности соответственно.

Эмпирическая функция радиационного распухания, являющаяся функцией времени и температуры, принимается согласно [1]:

$$S(T(r), t) = 4,9 \cdot 10^{-51} \cdot (\Phi \cdot t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{15490}{T} - \frac{5,98 \cdot 10^6}{T^2}}, \quad (2)$$

где  $t$  - время,  $\Phi$  - нейтронный поток,  $T$  - температурное поле как функция координат:

$$T(r, z) = T_s + \frac{q_v}{4\lambda} (R^2 - r^2), \quad (3)$$

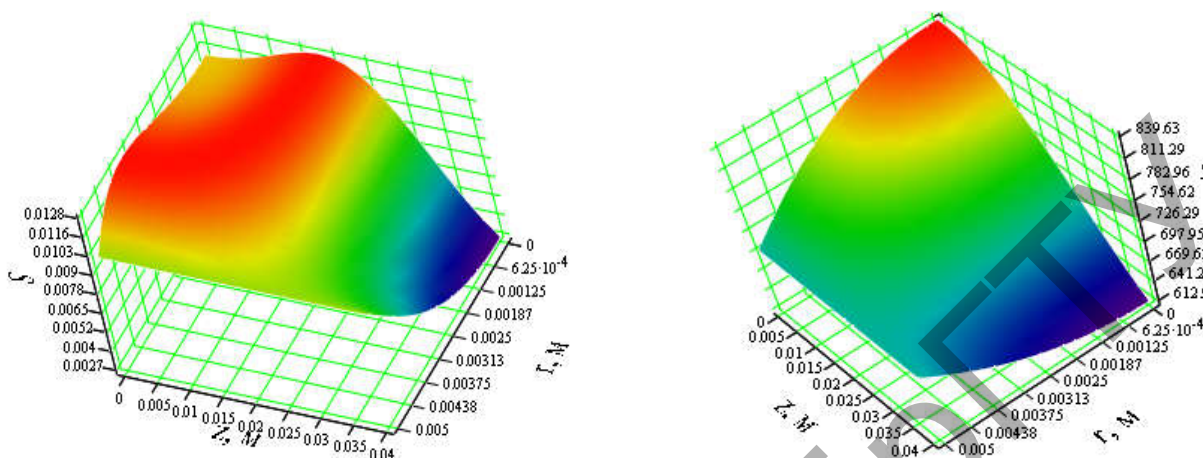
$T_s$  - температура на наружной поверхности,  $q_v$  - объемное тепловыделение, являющееся функцией координаты  $z$ ,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала,

$q_v = \bar{q}_v \cdot K_z \cdot \cos\left(\frac{\pi H}{H + 2H_0} \cdot \frac{z}{H}\right)$ , где  $\bar{q}_v = 2,234 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$  - внутренний

объемный источник тепловыделения,  $T_s = 700^\circ \text{C}$ .

С учетом характеристик для материала ОХ16Н15МЗБ [1] принимаем:  $K_z = 1,2$ ,  $\Phi = 2,81 \cdot 10^{19}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ ,  $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $E = 1,5 \cdot 10^{11}$  Па,

$\lambda = 12$  Вт/ (м·град) [1]. Размеры цилиндра:  $H=40$  мм,  $R= 5$  мм. Поверхности температурного поля и радиационного распухания для момента времени 1000 ч. приведены на рисунке 1.



S

T

Рисунок 1 – Поверхности температуры и радиационного распухания в момент времени 1000 часов

Уравнения обобщенного закона Гука при механическом, температурном и радиационном нагружении:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) + \alpha \cdot T(r, z) + \frac{S(r, z)}{3}, \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)) + \alpha \cdot T(r, z) + \frac{S(r, z)}{3}, \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)) + \alpha \cdot T(r, z) + \frac{S(r, z)}{3}, \\ \gamma_{rz} &= \frac{\tau_{rz}}{G}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала,  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  - модуль

сдвига.

Геометрические соотношения Коши, связывающие перемещения и деформации, следующие:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (5)$$

Выразив компоненты напряжений рассматриваемой задачи через перемещения  $u_r, u_z$ , и решая совместно (4) и (5), получены выражения для напряжений. С учетом этих выражений ДУ равновесия запишем в виде системы равновесия второго порядка в перемещениях:

$$\begin{aligned}
& E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + E \frac{\nu}{2(1-2\nu)(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_z}{\partial r \partial z} - E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \\
& - E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{u_r}{r^2} + \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{1}{1-2\nu} E \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{1-2\nu} E \cdot \frac{\partial S}{\partial r} = 0, \\
& E \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + E \frac{\nu}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{\partial^2 u_r}{\partial z \partial r} + \frac{\nu}{2(1-2\nu)} \frac{E}{1+\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial z} + \\
& + \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} - \frac{1}{(1-2\nu)} E \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{(1-2\nu)} E \cdot \frac{1}{3} \frac{\partial S}{\partial z} = 0. \tag{6}
\end{aligned}$$

Решение такой системы ДУ второго порядка в частных производных возможно только численным путем. Для ее решения воспользуемся методом конечных разностей (МКР), позволяющим перейти от систем ДУ к их аналогам – системе алгебраических уравнений с неизвестными значениями перемещений  $u_r, u_z$  в контурных и внутриконтурных точках, применив пошаговое разбиение по времени и составив конечно-разностные уравнения для каждого из временных шагов. Составлена система конечно-разностных аналогов уравнений (6) для внутренних точек области. Получены выражения осевых и радиальных перемещений для контурных точек области в конечных разностях с использованием граничных условий. Расчет контурных значений неизвестных перемещений проводится через контурные и внутриконтурные точки, что позволило снизить объем вычислительных операций и позволило снизить шаг сетки, повысив точность результатов.

Решение системы уравнений, включающей неизвестные значения перемещений  $u_r, u_z$  в контурных и внутриконтурных точках, проводится в среде Mathcad 15. Для этого разработана соответствующая программа, позволяющая получать численное решение системы ДУ (6) с граничными условиями. Программа предоставляет возможность пользователю варьировать не только характеристиками материала и внешними воздействиями, но и шагом сетки и граничными условиями, что значительно расширяет возможности исследователю.

Получены значения компонент напряжения  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  и деформаций  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \gamma_{rz}$  в зависимости от координат  $r$  и  $z$ . Исследована их зависимость от времени облучения и свойств материала. Кроме того, проведено исследование влияния температуры и радиационного нагружения на напряжения, деформации и перемещения.

Проведено решение некоторых тестовых задач. Достоверность результатов, ввиду отсутствия аналитических решений такого рода задач, проверялась при отдельном механическом и температурном нагружении. Сравнение результатов с аналитическим решением задач теории упругости и теплопроводности [2, 3] подтвердило достоверность конечно-разностных схем.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании новых конструкций, а также позволяют оптимизировать форму и размеры существующих конструктивных элементов при температурных, силовых и ра-

диационных воздействиях.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Куликов, И.С., и др. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С. Куликов, Б.Е. Тверковкин. – Мн., 1984. – 143 с.
2. Тимошенко, С.П., и др. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М., 1979. – 576 с.
3. Коваленко, А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. - Киев: Наукова думка, 1970. – 239 с.

УДК 621.794.61

### НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ZrCN:DLC ПОКРЫТИЯ

*Онысько С.Р.<sup>1</sup>, Хвисевич В.М.<sup>1</sup>, Чекан Н.М.<sup>2</sup>, Акула И.П.<sup>2</sup>*

- 1) Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь;
- 2) Физико-технический институт НАН Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь

Износостойкие покрытия стали неотъемлемым атрибутом современных металло- и деревообрабатывающих инструментов. Если до недавнего времени основным типом покрытия был нитрид титана, который использовался как универсальное покрытие для различных инструментов и условий обработки, то на сегодняшний день предпочтение отдается более специализированным покрытиям.

Авторами настоящей работы создан новый тип композиционных покрытий на основе нанокристаллического карбонитрида циркония и аморфного алмазоподобного углерода ZrCN:DLC [1]. В силу ряда особенностей роста твердых и сверхтвердых покрытий PVD методом, а также сильного различия температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и основы, на которую оно наносится, в формируемом тонкопленочном материале возникают сильные внутренние напряжения, достигающие нескольких гигапаскалей.

Детальное описание метода получения ZrCN:DLC покрытия приводится в работе [2]. Покрытия осаждались на полированные пластины из инструментальной стали X12M и твердого сплава BK10.

Характер взаимодействия тонких пленок и покрытий с основой всецело определяет напряжения первого типа в такого рода системах. Отсутствие каких-либо сил в направлении нормали к основе и возможности свободной деформации в этом направлении позволяет рассматривать покрытие как двuosную напряженную систему. Для произвольно ориентированного кристаллита, развернутого в плоскости покрытия на угол  $\phi$  и отклоненного от вертикали (нормали к плоскости основы) на угол  $\psi$ , величина относительной деформации определяется выражением [3]:

$$\frac{d-d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sin^2 \psi (\sigma_x \cos^2 \phi + \sigma_y \sin^2 \phi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y), \quad (1)$$

где  $d_0$  – межплоскостное расстояние для недеформированного кристаллита,  $E$  и  $\nu$  модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно.