

$$\sigma_{r\varphi}^{(3)} = 2G_3 \vartheta_{r\varphi}^{(3)}, \quad \sigma_{r\omega}^{(3)} = 2G_3 \omega_3 \vartheta_{r\omega}^{(3)}.$$

Обобщённые внутренние усилия, с учётом замены напряжения $\sigma_{\alpha}^{(k)}$ соответственно на $\sigma_{\alpha e}^{(k)}$, $\sigma_{\alpha\omega}^{(k)}$, будут следующими:

$$\begin{aligned} T_{\alpha} &= T_{\alpha e} - T_{\alpha\omega} = \sum_{k=1}^3 T_{\alpha e}^{(k)} - \sum_{k=1}^3 T_{\alpha\omega}^{(k)}, \\ M_{\alpha} &= M_{\alpha e} - M_{\alpha\omega} = \sum_{k=1}^3 M_{\alpha e}^{(k)} - \sum_{k=1}^3 M_{\alpha\omega}^{(k)}, \\ H_{\alpha e} &= M_{\alpha e}^{(3)} + c(T_{\alpha e}^{(1)} - T_{\alpha e}^{(2)}), \\ H_{\alpha\omega} &= M_{\alpha\omega}^{(3)} + c(T_{\alpha\omega}^{(1)} - T_{\alpha\omega}^{(2)}). \end{aligned}$$

Система дифференциальных уравнений равновесия в усилиях, описывающая деформирование круговой упругой трехслойной пластины на упругом основании была получена с помощью принципа Лагранжа в [2]. Поэтому ее можно применить и здесь как исходную:

$$\begin{aligned} T_{r,r} + \frac{1}{r}(T_r - T_{\varphi}) &= 0, \quad H_{r,r} + \frac{1}{r}(H_r - H_{\varphi}) = 0, \\ M_{r,rr} + \frac{1}{r}(2M_{r,r} - M_{\varphi,r}) &= -(q_0 - q_R). \end{aligned}$$

Выделяя в обобщенных внутренних усилиях линейные и нелинейные составляющие, получим их в виде:

$$\begin{aligned} T_{r,r} + \frac{1}{r}(T_r - T_{\varphi}) &= p_{\omega}, \quad H_{r,r} + \frac{1}{r}(H_r - H_{\varphi}) = h_{\omega}, \\ M_{r,rr} + \frac{1}{r}(2M_{r,r} - M_{\varphi,r}) &= -q_0 + q_R + q_{\omega}. \end{aligned}$$

Здесь в левой части уравнений собраны линейные составляющие обобщенных внутренних усилий, причем нижний индекс «e» в дальнейшем опущен для удобства. Нелинейные добавки сосредоточены справа и включены в слагаемое с нижним индексом « ω »:

$$\begin{aligned} p_{\omega} &= T_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(T_{r\omega} - T_{\varphi\omega}), \\ h_{\omega} &= H_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(H_{r\omega} - H_{\varphi\omega}), \\ q_{\omega} &= M_{r\omega,rr} + \frac{1}{r}(2M_{r\omega,r} - M_{\varphi\omega,r}). \end{aligned}$$

Граничные условия в усилиях замыкают постановку задачи теории малых упругопластических деформаций:

УДК 544.64:544.032.4

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НИТРИДНЫХ КЕРАМИК

Козловский А.Л., Гладких Т.М., Здоровец М.В.

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Нитрид алюминия (AlN) является керамическим материалом, который обладает чрезвычайно интересным сочетанием высокой теплопроводности и отличных изоляционных свойств, благодаря которым обусловлено широкое применение AlN в

$$\begin{aligned} T_r &= T_r^1 + T_{\omega}, \quad H_r = H_r^1 + H_{\omega}, \quad M_r = M_r^1 + M_{\omega}, \\ M_{r,r} + \frac{1}{r}(M_r - M_{\varphi}) &= Q^1 + M_{r\omega,r} + \frac{1}{r}(M_{r\omega} - M_{\varphi\omega}). \end{aligned}$$

Линейные (упругие) составляющие обобщенных внутренних усилий по-прежнему выражаются через перемещения по формулам приведенным в [2], поэтому система дифференциальных уравнений равновесия будет иметь вид:

$$L_2(a_1 u + a_2 \psi - a_3 w, r) = p_{\omega},$$

$$L_2(a_2 u + a_4 \psi - a_5 w, r) = h_{\omega},$$

$$L_3(a_3 u + a_5 \psi - a_6 w, r) - \kappa_0 w + t_f \Delta w = -q_0 + q_{\omega}.$$

a_i – коэффициенты, учитывающие упругие и геометрические параметры слоев, L_k – линейные дифференциальные операторы [3].

Краевая задача по определению прогиба круглой упругопластической пластины на основании Пастернака замыкается присоединением граничных условий.

$$u = \psi = w = w, r = 0 \text{ при } r = R.$$

При шарнирном опирании контура пластины $u = \psi = w = 0, M_r = 0$ при $r = R$.

В случае свободного контура пластины $\psi = 0, T_r = M_r = M_{r,r} = 0$.

Работа выполнена при финансовой поддержке БР ФФИ (проект № T18P-090).

Литература

- 1 Пастернак, П.Л. Основы нового метода расчёта фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М. : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1954. – 55 с.
- 2 Козел, А.Г. Перемещения в круговой трехслойной пластине на двухпараметрическом основании / А.Г. Козел // Механика. Исследования и инновации, 2017. – Вып. 10. – С. 90–95.
- 3 Козел, А.Г. Деформирование круговой трехслойной пластины, защемленной по контуру, на основании Пастернака / А.Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика. – Минск : БНТУ, 2018. – № 33. – С. 318–322.

энергетике, ядерной промышленности, конструктивных материалах и микроэлектронике. Например, он используется при изготовлении печатных плат (подложки) в полупроводниках или в качестве теплопоглотителя в светодиодной осве-

тительной технике или высокоточной электронике [1-3]. При этом одним из важных условий применимости керамических материалов в области разработки микроэлектронных устройств является изучение материалов к различным видам излучений. Изучение изменения свойств керамических материалов в результате взаимодействия с тяжелыми ионами, образование неравновесных концентраций дефектов при упругих и неупругих столкновениях налетающих ионов с атомами мишени может дать представление о процессах дефектообразования в керамических материалах и их устойчивости к радиационному облучению.

Образцы керамик AlN были приобретены у CRYSTAL GmbH (Germany), плотность материала составляла 3.226 г/см^3 . Твердость – 1100 кг/мм^2 , Удельное сопротивление $>10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Облучение образцов проводилось на ускорителе тяжелых ионов «ДЦ-60» Астанинского филиала Института Ядерной Физики ионами C^{2+} с энергией 40 кэВ с флюенсом от 10^{14} до 10^{15} ион/см^2 при температуре облучения 300 К . Согласно расчетам максимальной длины пробега и энергетических потерь налетающих ионов выполненных с помощью программного кода SRIM Pro 2013, максимальная длина пробега ионов C^{2+} с энергией 20 кэВ/заряд составляет $136 \pm 10 \text{ нм}$, радиальное отклонение – $35 \pm 5 \text{ нм}$, количество вакансий создаваемых одним ионом составило 268 ± 20 вакансий/ион. Энергетические потери ионов на электронах $dE/dx_{\text{elec}} = 0,32 \text{ кэВ/нм}$, энергетические потери на ядрах $dE/dx_{\text{nuclear}} = 0,12 \text{ кэВ/нм}$, энергия первично-выбитого атома составляет 25 эВ , в то время как энергия связи атомов в кристаллической решетке составляет 3.36 эВ .

На основе полученных данных методами РСА, РЭМ, ЭДС установлены зависимости изменения кристаллографических характеристик и прочностных свойств от дозы облучения ионами C^{2+} с энергией 40 кэВ . Установлено, что в результате облучения в приповерхностном слое наблюдается формирование примесной фазы Al_4C_3 , приводящей к увеличению параметров кристаллической решетки, что свидетельствует об имплантации ионов C^{2+} и формировании фазы внедрения

в структуре. При этом увеличение вкладов примесных фаз приводит к снижению интенсивности дифракционных пиков, а также их асимметрии, которая обусловлена увеличением микронапряжений и деформаций в решетке. Изменение параметров кристаллической структуры приводит к снижению плотности керамик и увеличению пористости за счет образования областей разупорядоченности в структуре. Снижение плотности материала и изменение кристаллографических характеристик, обусловленное процессами дефектообразования и последующей их миграции приводит к разрушению ионных и химических связей в материале, которые влияют на прочностные характеристики материала. Методом АСМ установлено, что увеличение дозы облучения приводит к увеличению плотности хиллоков и трещин на поверхности, которые приводят к снижению твердости приповерхностного слоя. Установлено, что в результате облучения и образования каскадов дефектов основные изменения прочностных свойств керамик наблюдаются в приповерхностном слое толщиной $200\text{-}250 \text{ нм}$.

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее проделанными исследованиями в этой области, а также могут внести существенный вклад в понимание процессов дефектообразования и радиационной устойчивости в керамических нитридных материалах, которые являются перспективными кандидатами для применения в современных ядерных реакторах.

Литература

1. Rosenberg Z., Brar N.S., Bless S.J. Dynamic high-pressure properties of AlN ceramic as determined by flyer plate impact // Journal of applied physics. – 1991. – V. 70. – № 1. – P. 167–171.
2. Wang K., Wang C. Aluminum vacancy related dielectric relaxations in AlN ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2018. – V. 101. – № 5. – P. 2009–2016.
3. Szenes G. Ion-induced amorphization in ceramic materials // Journal of nuclear materials. – 2005. – V. 336. – № 1. – P. 81–89.

УДК 620.179.14

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО МАГНИТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВЕДЕННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Короткевич З.М., Осипов А.А., Счастный А.С.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Контроль качества термообработки изделий из различных марок сталей с использованием той или иной магнитной характеристики широко применяется в настоящее время. Но не всегда по одной или двум магнитным характеристикам можно судить о качестве проведенной термооб-

работки. Это связано с тем, что для некоторых марок стали нет однозначной зависимости между измеряемой магнитной характеристикой и температурой термообработки на всем диапазоне ее изменения. Поэтому прибегают к использованию сочетания нескольких магнитных параметров,