

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шустер Г. Детерминированный хаос: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 242 с.
2. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: РХД, 2001. – 528 с.
3. Слободян С.М. Анализ и оптимизация телевизионного принципа сканирования фазового пространства оптическим фазометром: 2. Следящие микрорастры // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 40–46.
4. Левин Б.Р., Шварц В. Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
5. Слободян С.М., Сазанович В.М., Галахов В.Н. Следящая система с диссектором для измерения угловых флуктуаций оптического пучка // Приборы и техника эксперимента. – 1980. – № 4. – С. 192–194.
6. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
7. Слободян С.М. Оптимизация биморфного привода оптических измерительных систем с обратной связью // Измерительная техника. – 2003. – № 1. – С. 19–23.
8. Слободян С.М. Диффузия координат изображения в средствах видеонаблюдения // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 1. – С. 47–50.

УДК 539.32:548.053

УПРУГИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

В.Л. Ульянов, А.А. Ботаки, Э.В. Поздеева

Томский политехнический университет

E-mail: bottacchi@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований упругих характеристик и скоростей акустических волн в керамических диэлектриках, кристаллические фазы которых состоят из монокристаллов с преимущественно ионным типом связи.

Многофазные керамики находят широкое применение в промышленности и энергетике [1, 2]. Нами выполнены исследования упругих и акустических свойств электрокерамических диэлектриков МК, ГБ-7, УФ-46, СК-1 и СНЦ. Измерялись модули Юнга и сдвига, а также скорости распространения упругих продольных и поперечных волн. Поскольку эти материалы применяются в атомной энергетике, интерес представляло изучение воздействия на их упругие свойства реакторных нейтронов. Образцы подвергались бомбардировке нейтронами в канале атомного реактора. Флюенсы нейтронов составляли: $\Phi_1=1,20 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$ и $\Phi_2=1,73 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$; плотность потока нейтронов была $2,0 \cdot 10^{17} \text{ нейтрон/м}^2 \cdot \text{с}$; соотношение между быстрыми и тепловыми нейтронами составляло 1,6:20,0; средняя температура в канале реактора не превышала 200°C . Энергетический спектр быстрых нейтронов находился в диапазоне от 0,4 до 7,0 МэВ. Максимум приходился на интервал энергий 0,6...0,8 МэВ. Энергия тепловых нейтронов порядка $kT \approx 0,05 \text{ эВ}$. Измерения упругих и акустических параметров материалов производились в температурном диапазоне 100...300 К. Определялись характеристики исходных и подвергнутых воздействию реакторных нейтронных потоков материалов. Измерения выполнялись резонансным методом с использованием составного пьезоэлектрического вибратора. Методика измерений изложена в работах [3, 4].

Основной кристаллической фазой высокоглиноземистых керамик марок МК, ГБ-7 и муллитокорундовой керамики марки УФ-46 является корунд. Его содержание в МК – ~99 %, ГБ-7 – 91...92 % и УФ-46 – ~70 %; средние линейные раз-

меры зерен – 3...6 мкм). Алюмосиликатная форма выделений в виде тонких прожилок шириной порядка 1 мкм называется стеклофазой. Содержание алюмосиликатов в керамике МК около 1 %, в ГБ-7 – 8...9 % и в УФ-46 – ~30 %. Стеатитовые керамические материалы СК-1 и СНЦ близки по химическому составу. Они содержат кристаллофазу $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (60...65 %, размер зерен – 3...6 мкм) и алюмосиликатную стеклофазу – 35...40 % [1, 2].

Результаты измерений скоростей распространения упругих волн продольного v_l и крутильного v_t типов в керамиках разных марок представлены в табл. 1. Измерения скоростей v_l производились на частотах ~100 кГц, а v_t – на частотах ~75 кГц. Монотонность изменения с температурой скоростей упругих волн у всех рассматриваемых материалов означает, что в исследуемом диапазоне температур керамики не испытывают полиморфных превращений. Скорости монотонно возрастают с понижением температуры и с увеличением содержания кристаллической фазы. Быстрота изменения скорости распространения упругих волн с температурой тем выше, чем больше концентрация в керамике кристаллофазы. В близких по химическому и фазовому составу стеатитовых керамиках СК-1 и СНЦ оказались близкими по величине скорости упругих волн. Затухание ультразвуковых волн в керамиках увеличивалось с ростом температуры. Логарифмический декремент затухания δ , оцененный на частоте ~100 кГц в области температур 100...300 К, монотонно изменялся в пределах $(2,0...4,5) \cdot 10^{-4}$ для керамики марки МК; $(3,0...4,5) \cdot 10^{-4}$ – ГБ-7; $(4,2...5,0) \cdot 10^{-4}$ – УФ-46 и $(2,0...5,1) \cdot 10^{-4}$ – СК-1 и СНЦ.

Таблица 1. Скорости распространения упругих продольных v_l и поперечных v_t волн, м/с, в керамиках при различных температурах

Температура, T , К	Керамика									
	МК		ГБ-7		УФ-46		СК-1		СНЦ	
	v_l	v_t	v_l	v_t	v_l	v_t	v_l	v_t	v_l	v_t
100	9956	5947	9506	5575	7732	4545	6208	3618	6282	3651
140	9949	5943	9499	5570	7729	4538	6198	3608	6270	3643
180	9930	5930	9484	5560	7722	4530	6187	3600	6255	3632
220	9911	5906	9467	5543	7714	4517	6176	3593	6240	3619
260	9891	5889	9449	5521	7706	4500	6167	3579	6228	3609
300	9882	5880	9441	5516	7702	4488	6157	3570	6222	3596

Результаты измерений модулей упругости (модулей Юнга E и сдвига G) при различных температурах приведены в табл. 2.

Таблица 2. Модули Юнга E и сдвига G , ГПа, керамики при различных температурах

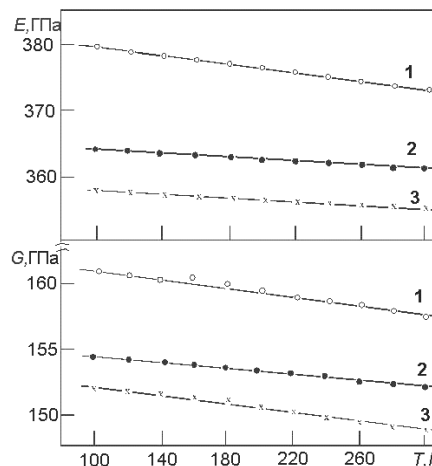
Температура, T , К	Керамика									
	МК		ГБ-7		УФ-46		СК-1		СНЦ	
	E	G	E	G	E	G	E	G	E	G
100	379,8	160,9	345,1	141,3	205,2	84,1	120,8	48,1	119,6	48,4
140	378,5	160,7	344,4	140,9	204,3	83,9	119,1	47,4	118,4	47,7
180	377,0	160,1	343,1	140,4	203,8	83,6	117,5	47,3	117,8	47,4
220	375,6	158,8	341,8	139,5	203,0	83,1	116,8	47,2	117,2	47,0
260	374,2	157,9	340,6	138,8	202,1	82,5	115,9	46,8	116,3	46,8
300	373,4	157,5	339,7	138,3	201,7	82,1	115,2	46,4	115,3	46,4

Из табл. 2 следует, что с повышением температуры модули упругости у всех исследуемых керамик монотонно убывают. Это является признаком ослабления с ростом температуры сил связи между структурными частицами диэлектрика. Отсутствие полиморфных превращений подтверждается монотонностью температурных изменений модулей упругости. Полученные результаты хорошо согласуются с данными рентгеноструктурного анализа этих материалов [1, 2]. Из сопоставления модулей упругости с составом керамики следует, что модули упругости и скорости их изменения с температурой тем выше, чем больше концентрация кристаллофазы. В близких по составу стеатитовых керамиках СК-1 и СНЦ близки соответствующие модули упругости. Значения модулей E и G стеатитовой керамики приблизительно втрое меньше соответствующих модулей высокоглиноземистой керамики и вдвое меньше, чем у муллито-корундовой керамики. Коэффициенты Пуассона, определяемые соотношением $\nu = E/2G - 1$, лежат в пределах 0,2...0,3. Они слабо зависят от температуры и состава керамики.

Анализ результатов измерений для всех керамик указывает на линейность температурных зависимостей модулей упругости. Температурные зависимости модулей Юнга E и модулей сдвига G высокоглиноземистой керамики МК приведены на рис. 1. На рис. 1 цифрой 1 обозначены зависимости в исходном материале, 2 и 3 — зависимости в образцах, подвергнутых воздействию нейтронов (2 — флюенс нейтронов Φ_1 , 3 — Φ_2). Вид графиков позволяет записать температурные зависимости $E(T)$ и $G(T)$ в виде аналитических соотношений:

$$E(T) = E_0 - \alpha_E \cdot T; \quad G(T) = G_0 - \alpha_G \cdot T. \quad (1)$$

Здесь E_0 и G_0 — модули упругости при температуре $T=0$ К (экстраполяция), α_E , α_G — их температурные коэффициенты, для нахождения которых использовался метод наименьших квадратов (среднеквадратичное отклонение $\pm 2\%$). Значения коэффициентов приведены в табл. 3. Уравнения (1) позволяют оценить модули упругости при температурах ниже 100 К.

**Рис. 1.** Температурные изменения модулей Юнга и сдвига керамики**Таблица 3.** Модули упругости при 0 К и их температурные коэффициенты аналитических уравнений для оценки температурных изменений модулей упругости керамических диэлектриков

Коэффициенты	Керамика				
	МК	ГБ-7	УФ-46	СК-1	СНЦ
E_0 , ГПа	383,2	348,2	206,9	124,3	121,2
$\alpha_E \cdot 10^4$, Па/К	34,09	28,64	17,95	29,54	19,09
G_0 , ГПа	163,3	143,1	85,4	48,7	49,1
$\alpha_G \cdot 10^4$, Па/К	19,77	16,14	10,76	7,27	9,22

Из табл. 3 следует, что в высокоглиноземистой и муллито-корундовой керамики модули упругости и их температурные коэффициенты зависят от содержания кристаллофазы.

Керамические диэлектрики являются многофазными материалами. Каждая из фаз относится к определенной кристаллографической системе. Для таких микронероводных материалов разработаны статистические методы расчета физических свойств [5]. Для определения усредненных значений модулей упругости керамических материалов марок МК, ГБ-7, УФ-46 была выбрана модель материала в виде изотропной смеси анизотропных фаз. В этой модели реализованы представления о хаотическом распределении фаз по ориентации и чередовании по объему. В расчетах проводится усреднение по ориентации кристаллографических фаз. Затем определяются средние значения модулей всестороннего сжатия $\langle B_i \rangle$ и сдвига $\langle G_i \rangle$ отдельных i -ых фаз. При этом используются методы усреднения по Фойгту — ур. (2), по Ройссу — ур. (3) и по Хиллу — ур. (4):

$$\left. \begin{aligned} \langle B_i \rangle_\phi &= 1/9[(c_{11} + c_{22} + c_{33}) + 2(c_{12} + c_{23} + c_{31})]; \\ \langle G_i \rangle_\phi &= 1/15[(c_{11} + c_{22} + c_{33}) - \\ &\quad - (c_{12} + c_{23} + c_{31}) + 3(c_{44} + c_{55} + c_{66})]; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \langle B_i^{-1} \rangle_p &= (s_{11} + s_{22} + s_{33}) + 2(s_{12} + s_{23} + s_{31}); \\ \langle G_i \rangle_p &= 1/15[4(s_{11} + s_{22} + s_{33} - s_{12} + s_{23} + s_{31}) + \\ &\quad + 3(s_{44} + s_{55} + s_{66})]; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \langle B_i \rangle_x &= 1/2(\langle B_i \rangle_\phi + \langle B_i \rangle_p); \\ \langle G_i \rangle_x &= 1/2(\langle G_i \rangle_\phi + \langle G_i \rangle_p). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Затем, учитывая хаотическое чередование фаз по объему, находились модули упругости $\langle B \rangle$ и $\langle G \rangle$ агрегата из изотропных фаз. При этом использовались соотношения вида:

$$\left. \begin{aligned} \langle B \rangle_\phi &= \sum_{i=1}^n v_i \langle B_i \rangle_\phi; \langle G \rangle_\phi = \sum_{i=1}^n v_i \langle G_i \rangle_\phi; \\ \langle B^{-1} \rangle_p &= \sum_{i=1}^n v_i \langle B_i^{-1} \rangle_p; \langle G^{-1} \rangle_p = \sum_{i=1}^n v_i \langle G_i^{-1} \rangle_p. \end{aligned} \right\}$$

Здесь v_i – объемная концентрация i -ой фазы. Средние значения модулей Юнга $\langle E \rangle$ и коэффициенты Пуассона $\langle \nu \rangle$ рассчитывались по формулам теории упругости. В зависимости от химического состава керамики и кристаллографических систем зерен использовались соответствующие значения модулей упругости c_{ik} и констант упругой податливости s_{ik} [3]. Погрешность расчета модулей упругости керамики по описанной выше методике не превышает 3 %, что сопоставимо с ошибкой эксперимента. В табл. 4 представлены результаты расчетов и измеренные значения модулей упругости для 300 К.

Таблица 4. Вычисленные по методам Фойгта, Ройсса и Хилла и измеренные при 300 К модули Юнга и сдвига, ГПа

Керамика	Расчетные значения модулей						Эксперимент	
	E			G				
	Фойгта	Ройсса	Хилла	Фойгта	Ройсса	Хилла	E	G
МК	393,4	427,0	410,2	160,3	173,9	167,1	373,4	157,5
ГБ-7	384,8	417,3	401,1	156,1	171,2	163,7	339,7	138,3
УФ-46	275,3	276,8	276,1	121,5	122,1	121,8	201,7	82,1

Сравнение расчетных и измеренных значений подтверждает правильность выбора модели расчета. Рассматривая керамику как изотропную смесь анизотропных фаз, можно прогнозировать технически важные характеристики создаваемых материалов по известным параметрам их компонентов и концентрациям. Некоторое расхождение расчетных и экспериментальных данных обусловлено неоднородностью деформаций и напряжений по объему материала, отличием формы кристаллических зерен от сферической.

Влияние потока реакторных нейтронов на упругие и акустические характеристики керамических диэлектриков вызвано столкновением ней-

тронов с ядрами вещества, в которое они проникают. При оценке важны энергия нейтронов и химический состав материалов. Результаты измерений в интервале температур 100...300 К упругих и акустических характеристик керамики, подвергнутых воздействию нейтронов, представлены в табл. 5 и 6. Измерения проводились через месяц после нейтронного воздействия. Образцы в течение этого срока находились при температурах, близких комнатной. Измерения выполнялись в специальном криостате, в котором для охлаждения использовался жидкий азот. Сравнение значений, полученных как при постепенном понижении, так и повышении температуры, подтвердило отсутствие значительного теплового гистерезиса.

Таблица 5. Скорости распространения продольных v_l , поперечных v_t , упругих волн, м/с, при изменении температуры керамики, подвергнутых воздействию нейтронов

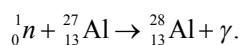
Флюенс нейтронов	Температура, Т, К	Керамика									
		МК		ГБ-7		УФ-46		СК-1		СНЦ	
		v_l	v_t	v_l	v_t	v_l	v_t	v_l	v_t	v_l	v_t
Φ_1	100	9757	5828	9268	5441	7501	4413	6001	3496	6075	3534
	200	9740	5811	9239	5414	7485	4385	5974	3473	6039	3512
	300	9714	5781	9205	5381	7442	4338	5948	3450	6017	3481
Φ_2	100	9677	5780	9221	5413	7485	4404	5997	3502	6065	3532
	200	9658	5753	9192	5386	7471	4381	5971	3481	6032	3509
	300	9632	5720	9158	5359	7455	4344	5948	3456	6007	3479

Таблица 6. Модули Юнга E и сдвига G , ГПа, при изменении температуры керамики, подвергнутых воздействию нейтронов

Флюенс нейтронов	Температура, Т, К	Керамика									
		МК		ГБ-7		УФ-46		СК-1		СНЦ	
		E	G	E	G	E	G	E	G	E	G
Φ_1	100	364,1	154,6	327,8	134,4	192,6	79,4	110,6	44,7	111,4	44,9
	200	362,9	153,7	325,7	133,1	191,8	78,4	109,6	44,1	110,1	44,4
	300	360,9	152,1	323,3	131,5	191,1	76,7	108,7	43,5	109,3	43,5
Φ_2	100	358,2	152,0	324,5	133,1	191,8	79,0	110,5	44,9	110,9	44,8
	200	356,8	150,6	322,4	131,7	191,1	78,2	109,5	44,3	109,8	44,2
	300	354,9	148,9	320,0	130,4	190,3	76,9	108,6	43,6	108,9	43,5

Воздействие нейтронов приводит к уменьшению скоростей распространения упругих волн v_l и v_t у всех исследованных керамических материалов. При этом в высокоглиноземистой и стеатитовой керамике несколько уменьшается затухание ультразвуковых волн во всем диапазоне температур 100...300 К, при которых производились измерения. Наименьшее влияние воздействие нейтронов оказывает на керамики с небольшим содержанием Al_2O_3 (МК, ГБ-7). Теоретический анализ процессов рассеяния нейтронов на связанных ядрах затруднен, и предлагаемое обсуждение носит самый общий характер. Нейтроны с энергией ~1 МэВ могут рассеиваться на легких атомах, передавая им значительную часть своей энергии. Возможно, в этом причина большего влияния нейтронного облучения на те керамики, в составе которых много Al_2O_3 . Медленные нейтроны хорошо взаимодействуют с

ядрами и поглощаются ими в реакциях нейтронно-ядерного радиационного захвата. Захват нейтрона ядром сопровождается испусканием γ -лучей, например, в реакции вида



Анализ экспериментальных результатов, приведенных в табл. 6, показывает, что модули упругости керамик, подвергнутых воздействию нейтронов, уменьшаются с повышением температуры. Температурные зависимости $E(T)$ и $G(T)$ остаются линейными. Но воздействие нейтронов уменьшает величины модулей упругости. Наибольшие изменения происходят при воздействии до флюенса Φ_1 . В дальнейшем, с увеличением времени облучения скорость уменьшения E и G замедляется. Наименьшие изменения модулей Юнга и сдвига наблюдались у керамик марок МК и ГБ-7. Это дает основание предположить, что уменьшение модулей упругости при воздействии нейтронов вызвано не только ослаблением сил взаимодействия между структурными частицами кристаллов, но и сил межатомного сцепления (прочности межатомных связей) по границам кристаллитов и на границах контакта кристалло- и стеклофаз. Изменение коэффициентов Пуассона после нейтронного облучения для всех керамических диэлектриков не превышало 3 %.

Бомбардировка нейтронами приводит к изменению объема керамических материалов. При этом относительное изменение объема $\Delta V/V_0 = \chi(\Phi)$ зависит от флюенса нейтронов Φ . В работе [4] показано, что

$$\chi(\Phi) = a \left[\frac{\exp(b\Phi) - 1}{1 + (a/x_{\max}) \exp(b\Phi)} \right]. \quad (5)$$

Здесь a, b – константы. Для керамики марки МК было получено $\chi(\Phi_1)=0,072$ и $\chi(\Phi_2)=0,178$; марки ГБ-7 $\chi(\Phi_1)=0,179$ и $\chi(\Phi_2)=0,230$; УФ-46 $\chi(\Phi_1)=0,200$ и $\chi(\Phi_2)=0,250$. Это позволило получить соотношение для оценки изменений модуля Юнга при нейтронном воздействии на керамики

$$E = E_n \left[1 + \frac{(2x-1)x}{3(x+1)} \right]. \quad (6)$$

В соотношении (6) E_n – модуль Юнга до воздействия нейтронов, а $x=\chi(\Phi)$, которое определяется из ур. (5). В частности, для керамики МК $E=366,2$ ГПа при флюенсе нейтронов $\Phi_1=1,20 \cdot 10^{19}$ нейтрон/м² и $E=361,3$ ГПа при $\Phi_2=1,73 \cdot 10^{22}$ нейтрон/м²; для керамики ГБ-7 $E=328,7$ ГПа при флюенсе Φ_1 и $E=327,2$ ГПа при флюенсе Φ_2 ; для керамики УФ-46 $E=195,1$ ГПа при Φ_1 и $E=194,9$ ГПа при Φ_2 . Сравнение с данными табл. 5 и 6 указывает на хорошее согласие (в пределах 2...5 %) между измеренными и вычисленными значениями модулей Юнга. Формула (6), по нашим оценкам, позволяет получать разумные значения модулей Юнга после реакторного и нейтронного облучения (до флюенсов нейтронов $\Phi \leq 10^{23}$ нейтрон/м²) керамик, содержание Al_2O_3 в которых более 75 %.

Основываясь на положениях теории конечных деформаций, можно получить соотношения, позволяющие оценить модули упругости керамических диэлектриков, подвергнутых гидростатическому сжатию (нагруженные керамические диэлектрики):

$$E = E_0 \{ 1 + [(3\lambda + 5\mu)(\lambda + 2\mu) / \mu(3\lambda + 2\mu)(\lambda + \mu)] p \};$$

$$G = G_0 \{ 1 + [3(\lambda + 3\mu) / \mu(3\lambda + 2\mu)] p \}. \quad (7)$$

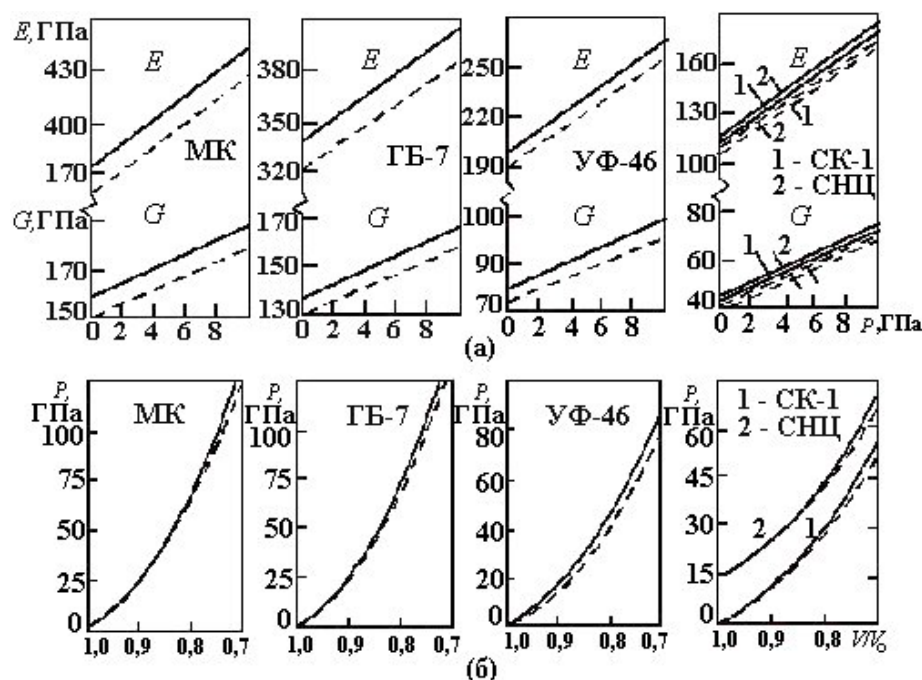


Рис. 2. Зависимости модулей Юнга и сдвига от давления (а) и уравнения состояния (б) керамических диэлектриков: 1) исходные материалы; 2) подвергнутые воздействию нейтронных потоков с $\Phi=1,73 \cdot 10^{22}$ нейтрон/м²

В соотношениях (7) модули Юнга E_0 , сдвига G_0 и постоянные Ламе λ , μ берутся для ненагруженных керамик (при атмосферном давлении $p=p_{\text{атм}}$). Проведенные оценки показывают, что модули упругости E и G монотонно возрастают при увеличении давления. Наглядно это демонстрируется графиками, приведенными на рис. 2.

При сжатии модули упругости керамики, подвергнутой воздействию нейтронов, по величине остаются меньше модулей упругости в исходном состоянии. Наименьшие изменения упругих характеристик при сжатии имеют место для высокоглиноземистой керамики. При этом соотношения между коэффициентами сжатия $\alpha_p = dM/M_0 dp$ ($M=E, G$) следующие: $\alpha_p(\text{МК}) < \alpha_p(\text{ГБ-7}) < \alpha_p(\text{УФ-46}) < \alpha_p(\text{СК-1}) \approx \alpha_p(\text{СНЦ})$. При сжатии на один и тот же объем нужно в случае

керамики, подвергшейся нейтронному воздействию, приложить к образцу меньшее давление.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Упругие свойства керамик при облучении ухудшаются. Подвергнутая воздействию нейтронов керамика становится более «мягкой» по сравнению с исходным состоянием. Результаты измерения упругих и акустических свойств керамик позволяют косвенно судить о дальнейшей эксплуатационной пригодности этих материалов. Наименее радиационно-стойкими являются керамики с большим содержанием Al_2O_3 . Полученные результаты могут быть использованы для оценки прочностных свойств керамических диэлектриков при конструировании устройств, работающих в условиях радиации и высоких давлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костюков Н.С., Антонова Н.П., Зильберман М.И., Асеев Н.А. Радиационное электроматериаловедение. — М.: Атомиздат, 1979. — 224 с.
2. Костюков Н.С., Муминов М.И., Ким Ген Чан. Радиационные эффекты в керамических диэлектриках. — Ташкент: Фан, 1986. — 160 с.
3. Никаноров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. — М.: Наука, 1985. — 250 с.
4. Беломестных В.Н., Похолоков Ю.П., Ульянов В.Л., Хасанов О.Л. Упругие и акустические свойства ионных, керамических диэлектриков и высокотемпературных сверхпроводников. — Томск: СТУ, 2001. — 226 с.
5. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. — М.: Наука, 1977. — 400 с.

УДК 538.945

ЛОКАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В НЕРЕГУЛЯРНОЙ ВИХРЕВОЙ РЕШЕТКЕ СВЕРХПРОВОДНИКА II РОДА

А.В. Минкин, С.Л. Царевский

Казанский государственный университет

E-mail: Alexander.Minkin@ksu.ru

С помощью модифицированного уравнения Лондонов для сверхпроводников II рода с $\kappa \gg 1$ (κ — параметр Гинзбурга-Ландау) найдено распределение магнитного поля $\mathbf{h}(\mathbf{r}, z)$ и функция распределения $f(h, z, \sigma)$ для регулярной и нерегулярной решеток вихрей Абрикосова на разных глубинах z от поверхности сверхпроводника. Показано, что в зависимости от «степени нерегулярности» вихревой решетки сверхпроводника локальное магнитное поле существенно изменяется.

В последние годы значительно возрос интерес к изучению приповерхностных свойств высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, такие экспериментальные методы, как ЯМР [1, 2], методы сканирования магнитного поля на поверхности сверхпроводника [3, 4] дают детальные сведения о различных свойствах сверхпроводников вблизи поверхности образца. Во-вторых, в связи с возможным использованием ВТСП-пленок в различного типа наноструктурах [5, 6]. Для надежной интерпретации экспериментальных данных во многих случаях необходимо знать функцию распределения локального магнитного поля сверхпроводника на различной глубине от поверхности образца. До сих пор вычисление функции распределения локаль-

ного магнитного поля проводились либо для регулярных вихревых решеток [7–10], либо для случая полного хаоса в распределении вихрей Абрикосова — случайного некоррелированного распределения вихрей [11], при котором нет никаких признаков регулярной вихревой решетки. Однако достаточно часто реализуется случай нерегулярной вихревой решетки. Ее можно представить как решетку вихрей, в которой каждый i -ый вихрь расположен не точно в узле регулярной решетки, а смещен на некоторый случайный вектор $\mathbf{a}_i$ от своего регулярного положения в решетке при условии, что $a_i \ll L$ (L — среднее расстояние между вихрями). Такие смещения $\mathbf{a}_i$ могут происходить как вследствие пиннинга вихрей, так и вследствие достаточно медленных тепловых колебаний вихревой решетки.