

УПРАВЛЕНИЕ ПРОФИЛЕМ И КРИВИЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БИМОРФОВ

© 2019 г. В. В. Грибко^{a,*}, А. С. Маркелов^a, В. Н. Трушин^a, Е. В. Чупрунов^a

^a Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, физический факультет
Россия, 603950, Н. Новгород, просп. Гагарина, 23

*e-mail: gribkovladimir@icloud.com

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.

После доработки 05.03.2019 г.

Принята к публикации 07.03.2019 г.

Исследована возможность управления кривизной профилем поверхности рентгенооптических элементов, в качестве которых использовались монокристаллические пластины SiO₂(011) прямоугольной и трапециевидной форм. В регуляторах изгиба (р.и.) различной формы активным элементом служил пьезоэлектрический биморф, приклеенный к монокристаллической пластине. Приведены экспериментальные и расчетные данные изменений профиля и радиуса кривизны поверхности используемой пластины. Показано влияние форм составных частей р.и. на исходный профиль и кривизну поверхности рентгенооптических элементов.

DOI: 10.1134/S0032816219040256

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы приложены большие усилия для разработки и производства рентгенооптических элементов с высокой разрешающей способностью, используемых в таких отраслях науки, как рентгеновская астрономия [1–4], медицина, материаловедение, а также при изучении биологических объектов, в микро- и наноэлектронике, в наземных объектах, таких как синхротроны и рентгеновские лазеры на свободных электронах (free-electron laser, FEL). Основной характеристикой таких оптических элементов является размер фокального пятна.

В настоящее время для управления параметрами сходимости рентгеновского излучения применяются зонные пластины Френеля, многослойные зеркала, конические капилляры, а также изогнутые кристаллы. Наиболее используемыми являются изогнутые кристаллы/зеркала, принцип действия которых основан на полном внешнем отражении рентгеновских лучей от изогнутой поверхности, в частности эллиптической (для фокусировки точка-точка) и параболической (в случае коллимации пучка). В идеальном случае геометрии фокусировки точка-точка профиль поверхности оптического элемента представляет собой короткую секцию эллипсоида с источником и его изображением, находящимся в фокусах эллипса. Обыч-

но меридиональный (параллельный плоскости падения) радиус кривизны R_m больше сагиттального (перпендикулярного плоскости падения) радиуса кривизны R_s , что следует из следующих выражений [5]:

$$R_m = \frac{2rr'}{\sin \theta_c (r + r')}; \quad R_s = 2 \sin \theta_c \left(\frac{rr'}{r + r'} \right), \quad (1)$$

где θ_c – угол падения, а r и r' – расстояния от источника до зеркала и от зеркала до изображения соответственно. В предельном случае, когда r' стремится в бесконечность в уравнении (1), мы переходим от фокусировки излучения к коллимации, а форма зеркала стремится к параболической.

Наиболее распространенными методами придания рентгенооптическим элементам заданного профиля является их упругий изгиб [6, 7] и шлифование заданных поверхностей, в частности, с помощью электролитической обработки поверхности (ELID-шлифовка) [8]. Одним из недостатков данных методов является сложность их применения для создания двумерных профилей поверхности. Для формирования последних было предложено использовать пластически деформированные кристаллы [9]. В связи с задачей повышения точности контроля оптических поверхностей популярность набирают адаптивные рентге-

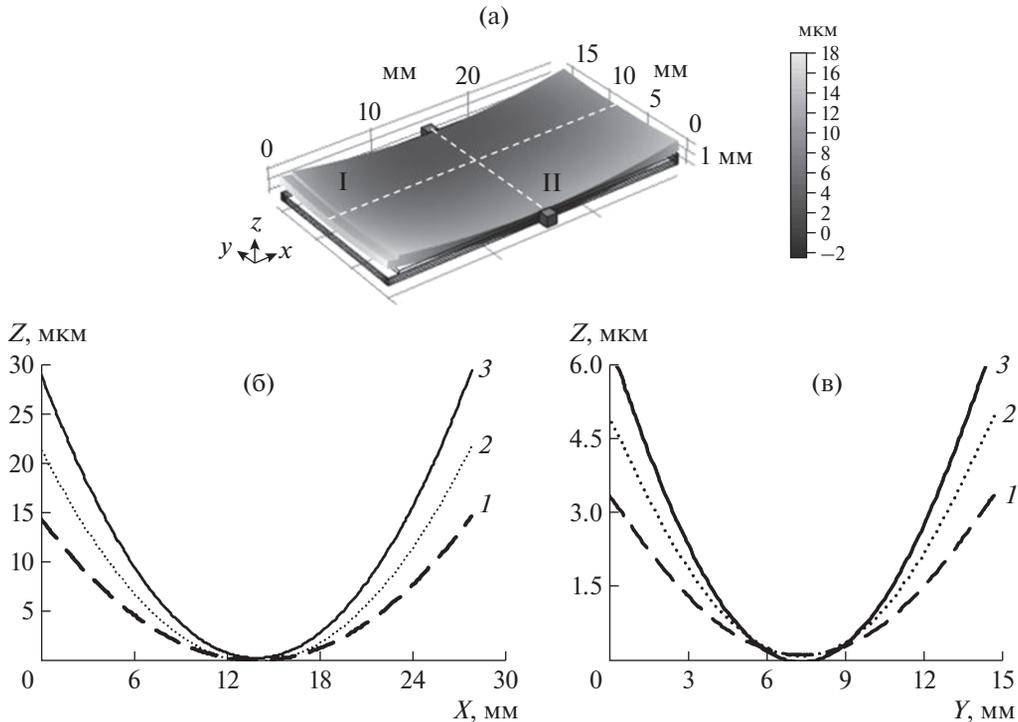


Рис. 1. Изменение профиля поверхности пластины SiO_2 прямоугольной формы от величины приложенного к биморфу электрического поля: **а** – схематическое изображение модельного образца; **б** и **в** – расчетные зависимости изменения профилей поверхности пластины в сечениях плоскостями I ($z=0x$) (**б**) и II ($z=0y$) (**в**) при приложении к биморфу электрического поля напряженностью 52 (1), 104 (2) и 261 (3) В/мм.

нооптические элементы [1–3, 10], управляемые с помощью механических или пьезоэлектрических приводов. Для подобных систем в литературе [11] приведены данные по влиянию прикладываемого к электродам напряжения на радиус кривизны верхней отражающей пластины. Показано, что на кривизну ее поверхности в основном влияет величина пьезомодуля d_{31} ; вид зависимости описывается следующим образом:

$$R = h^2 / (\alpha d_{31} U), \quad (2)$$

где h – общая толщина системы; U – прикладываемое напряжение к биморфу; α – постоянная для конкретной системы, определяемая физическими параметрами каждого слоя и его толщиной. Однако в случае сложных форм зеркал на биморфных подложках и при учете влияния анизотропии отражающей пластины необходимо проводить численные расчеты.

В данной работе исследуется влияние форм составных частей регуляторов изгиба (р.и.), приведены расчетные и экспериментальные данные по влиянию электрического поля, приложенного к пьезоэлектрическому биморфу, на кривизну и профиль поверхности монокристаллической пластины $\text{SiO}_2(011)$.

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОФИЛЯ

Расчет изменений профиля и радиуса кривизны поверхности монокристаллической пластины SiO_2 в составе р.и. проводился с использованием уравнения пьезодеформации совместно с уравнением упругого равновесия с учетом упругих и электрических характеристик системы:

$$\epsilon_{ij} = c_{ijkl}^E \sigma_{kl} + d_{ijk} E_k; \quad D_i = k_{ijk} \sigma_{jk} + e_{ij} E_j, \quad (3)$$

где ϵ_{ij} , σ_{kl} – компоненты тензоров механического напряжения и деформаций составных частей дифракционного блока; D_i , E_j – компоненты векторов электрической индукции, напряженности электрического поля; c_{ijkl}^E – компоненты тензора упругости составных частей дифракционного блока; d_{ijk} , k_{ijk} – пьезоэлектрические постоянные.

Для численного решения системы (3) нами использовался программный пакет COMSOL Multiphysics, позволяющий решать дифференциальные уравнения методом конечных элементов.

В качестве модельного образца был выбран р.и., представляющий собой многослойную структуру, состоящую из основания – пьезоэлектрического биморфа с пьезокерамикой PZT-5Н, заключенной между алюминиевыми электродами, слоя клея (парафина) толщиной 30 мкм и пластины

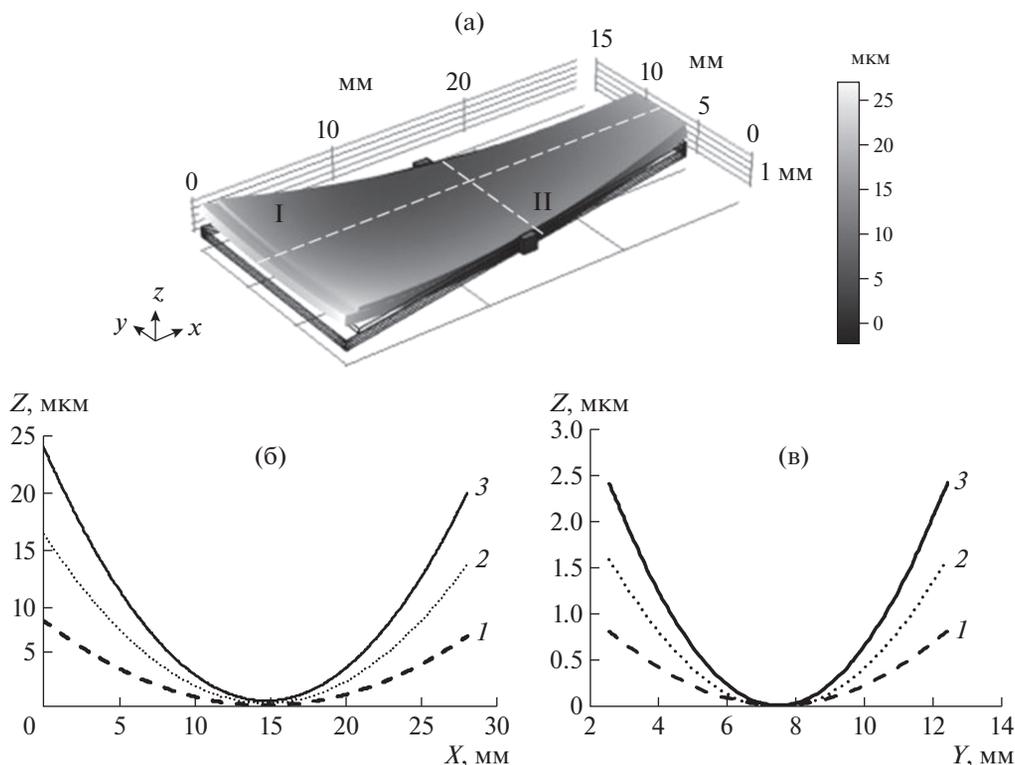


Рис. 2. Изменение профиля поверхности пластины SiO_2 трапециевидной формы от величины приложенного к биморфу электрического поля: **а** – схематическое изображение модельного образца; **б, в** – расчетные зависимости изменения профиля пластины в сечениях плоскостями I (zOx) (**б**) и II (zOy) (**в**) при приложении к биморфу электрического поля напряженностью 52 (1), 104 (2) и 261 (3) В/мм.

$\text{SiO}_2(011)$ толщиной 300 мкм. Пьезоэлектрический биморф состоит из пьезокерамики PZT-5Н ($d_{31} = 7.41 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н, модуль Юнга $E = 1.27 \cdot 10^{11}$ Па, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3400$) толщиной 190 мкм, среднего латунного электрода толщиной 212 мкм и внешних алюминиевых электродов толщиной 14 мкм. Форма р.и. имела вид прямоугольника (рис. 1а) размером 28×15 мм, толщиной 0.95 мм.

Начальным условием являлась нулевая кривизна р.и. и пластины SiO_2 . Возможность создания р.и. с нулевой кривизной нами была показана в работах [12, 13]. Модельный образец жестко фиксировался с двух противоположных сторон. На средний электрод подавался потенциал $+U$, внешние электроды имели нулевой потенциал. Указанные профили строились по смещению ΔZ точек поверхности исходного профиля пластины SiO_2 вдоль координаты Y , проходящей через середину образца.

На рис. 1 приведен рассчитанный профиль поверхности монокристаллической пластины SiO_2 , сформированный под воздействием на пьезокерамический биморф электрического поля разной напряженности. Поверхность пластины SiO_2 в составе р.и. (рис. 1а) представляет собой параболоид с

рассчитанными в центре пластины локальными радиусами кривизны: вдоль большей ее стороны (ось OX , рис. 1б) $R_m = 2.25$ м ($E = 52$ В/мм), 1.93 м ($E = 104$ В/мм), 1.37 м ($E = 261$ В/мм); вдоль оси OY (рис. 1в) $R_s = 1.5$ м ($E = 52$ В/мм), 1.36 м ($E = 104$ В/мм), 0.98 м ($E = 261$ В/мм).

Аналогичные расчеты были выполнены для образца, составные части которого имели форму равнобедренной трапеции с размерами оснований 15 и 5 мм. Профиль поверхности пластины SiO_2 трапециевидного р.и. и ее сечения показаны на рис. 2. При приложении к биморфу электрического поля напряженностью 52 В/мм профиль поверхности пластины SiO_2 описывается параболоидом с локальными радиусами кривизны в центре образца вдоль оси OX 2.13 м (рис. 2б, сечение I), а вдоль оси OY 1.35 м (рис. 2в, сечение II).

На форму и кривизну профиля поверхности пластины SiO_2 влияет способ крепления р.и. На рис. 3б показано изменение профиля сечения (положение сечения показано штриховой линией на рис. 3а) поверхности пластины SiO_2 в зависимости от положений точек крепления р.и. при приложении к биморфу электрического поля $E = 52$ В/мм. Величина отступа точки крепления от края образца составляла: 0 (случай консольного

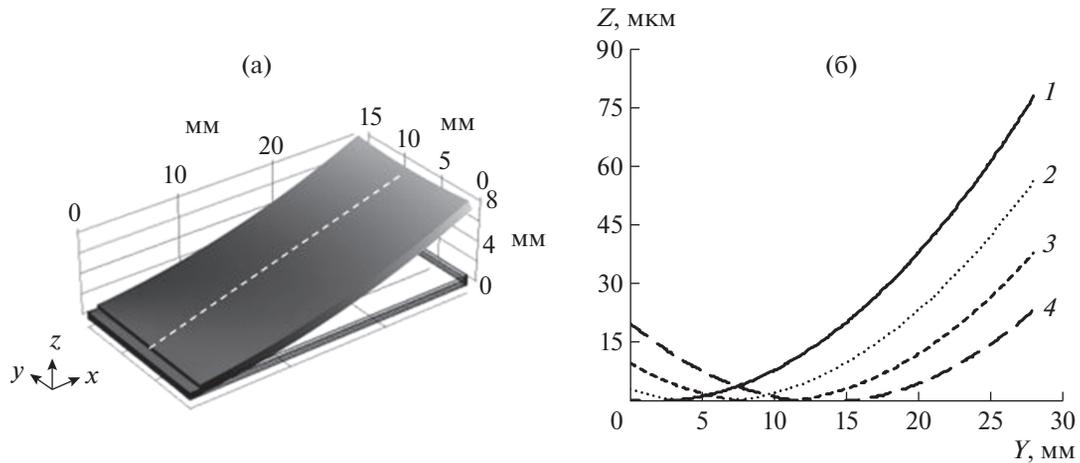


Рис. 3. Изменение профиля поверхности пластины SiO_2 от положения точек крепления р.и. при приложении к биморфу электрического поля $E = 52 \text{ В/мм}$: а – регулятор изгиба; б – расчетные зависимости изменения профиля поверхности пластины в зависимости от положения (отступа от края образца) точек крепления регулятора изгиба: 1 – 0 (случай консольного крепления); 2 – 4; 3 – 10; 4 – 14.5 мм (середина образца).

крепления), 4, 10 и 14.5 мм (середина образца). Сечения профиля поверхности описываются дугами парабол с радиусами кривизны в центре от 1.1 до 5.3 м.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследовалось влияние напряжения, приложенного к пьезоэлектрическому биморфу, на радиус кривизны поверхности пластины $\text{SiO}_2(011)$ в

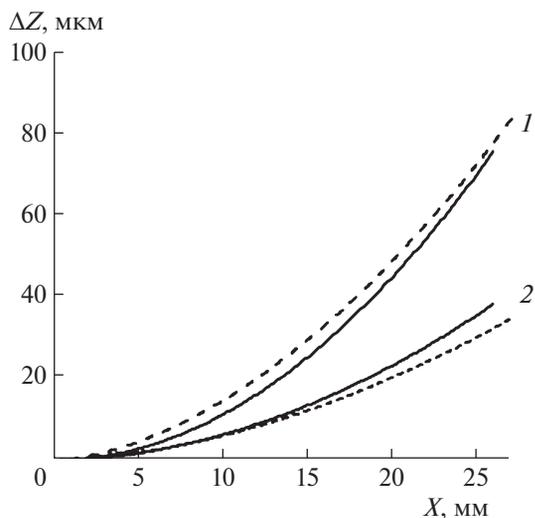


Рис. 4. Изменения сечения ΔZ (см. рис. 1, 2) профилей поверхности пластины SiO_2 , полученные для трапециевидного (1) и прямоугольного (2) образцов в случае их консольного крепления при приложении к биморфу электрического поля напряженностью 104 В/мм. Сплошные линии – экспериментальные данные, штриховые – расчетные.

составе прямоугольного и трапециевидного р.и. Пластина $\text{SiO}_2(011)$ толщиной 315 мкм крепилась с помощью парафина на пьезоэлектрический биморф. Кривизну профиля поверхности пластины измеряли на дифрактометре Bruker D8 Discover ($\text{CuK}\alpha_1$ -излучение, диаметр падающего рентгеновского пучка 1 мм). Сечение профиля поверхности определяли по смещению центра тяжести серии кривых качания $\text{SiO}_2(011)$, полученных при последовательном перемещении области засветки по поверхности пластины вдоль оси OX , проходящей через середину пластины (на вставках к рис. 1–3 показана выбранная система координат). Полученные профили аппроксимировались методом наименьших квадратов с коэффициентами корреляции не ниже 0.999. Напряжение на подложке изменяли программируемым источником постоянного тока.

Гистерезис и ползучесть (крип) пьезокерамики могут оказывать влияние на зависимость углового положения кривых качания пластины $\text{SiO}_2(011)$ от приложенного к пьезоэлектрическому биморфу напряжения. Для уменьшения этого влияния съемка кривых качания проводилась с интервалом времени не менее 15 мин после изменения напряженности электрического поля.

Образцы, параметры которых соответствовали параметрам расчетных образцов, крепились консольно, трапециевидный образец крепился со стороны большего основания. На рис. 4 показаны изменения сечения исходного профиля поверхности пластины SiO_2 , полученные для трапециевидного (кривая 1) и прямоугольного (кривая 2) образцов в случае их консольного крепления при приложении к биморфу электрического поля 104 В/мм (сплошными линиями обозначены эксперимен-

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные параметры сечений профилей поверхности пластины SiO₂, полученные в результате приложенного электрического поля напряженностью 104 В/мм к регуляторам изгиба прямоугольной и трапециевидной форм

Форма р.и.	R_m , м		F , м	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
Прямоугольная	8.63	8.5	10.6	10.8
Трапециевидная	6.42	6.16	10.12	9.89

тальные данные, штриховыми – расчетные). Сечения профилей поверхности на рис. 4 описываются параболой с радиусами кривизны и фокусами, указанными в табл. 1.

Расчет локального радиуса кривизны проводился в вершине параболы по формуле [14]:

$$R = \frac{(\sqrt{1 + y'^2})^3}{|y''|}, \quad (4)$$

где y – аппроксимирующая функция полученных сечений; y' и y'' – ее производные первого и второго порядка соответственно.

Полученные значения радиусов кривизны соответствовали значениям, рассчитанным по формуле (5) [15]:

$$R = s/\Delta\theta, \quad (5)$$

где s – расстояния между точками съемки кривых качания; $\Delta\theta$ – угловой сдвиг кривых качания.

При используемых в экспериментах небольших напряжениях гистерезис практически отсутствовал, на что указывало восстановление кривизны поверхности кристаллической пластинки и, следовательно, самого биморфа после снятия с него напряжения.

ВЫВОДЫ

На примере р.и. прямоугольной и трапециевидной форм, активным элементом в которых служил пьезоэлектрический биморф из пьезокерамики PZT, показана возможность управления кривизной профилей поверхности рентгенооптических элементов, что может быть использовано для коллимации рентгеновских пучков.

В ходе расчетов было показано, что на форму и кривизну профиля поверхности рентгенооптических элементов в составе р.и., кроме толщины слоев и величины пьезомодуля d_{31} [11], оказывает влияние форма слоев р.и., а также способ его крепления. В частности, показано, что при использовании р.и. прямоугольной и трапециевидной форм можно получить параболические про-

фили с радиусами кривизны от ∞ до 1 м и фокусами до 0.95 м.

Отличие экспериментальных данных от расчетных можно объяснить неоднородностью толщины слоя клея при наклеивании пластины SiO₂ на биморф. Также отличие может быть связано с неточным соответствием положений линий на исследуемых образцах, вдоль которых проходила съемка кривых качания, и линий, вдоль которых проводился расчет по смещению ΔZ точек поверхности образца. В работе показано, что при использовании р.и. трапециевидной формы можно получить меньший радиус кривизны поверхности пластины по сравнению р.и. прямоугольной формы. Минимальный радиус кривизны пластины достигается в случае консольного крепления р.и. и составляет 1.1 м при подаче на биморф электрического поля напряженностью 52 В/мм (рис. 3б, сечение I).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнялась в рамках государственного задания № 16.7443.2017/БЧ Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carolyn Atkins* // Proc. of SPIE. 2008. V. 6721. 67210T-2. doi 10.1117/12.782955
2. *Weisskopf M.C.* // Adv. Space Res. 2003. V. 32. № 10. P. 2005.
3. *Jansen F., Lumb D., Altieri B., Clave J., Ehle M., Erd C., Gabriel C., Guainazzi M., Gondoin P., Much R., Munoz R., Santos M., Schartel N., Texier D., Vacanti G.* // Astronomy & Astrophysics. 2001. V. 365. P. L1–L6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000036>
4. *Windhorst R.A., Cameron R.A., Brissenden R.J., Elvis M.S., Fabbiano G., Gorenstein P., Reid P.B., Schwartz D.A., Bautz M.W., Figueroa-Feliciano E., Petre R., White N.E., Zhang W.W.* // New Astronomy Reviews. 2006. V. 50. P. 121. <https://doi.org/10.1016/j.newar.2005.11.019>
5. *Susini J.* // Optical Engineering. 1995. V. 34. № 2. P. 361.
6. *Блохин М.А.* Методы рентгеноспектральных исследований. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит.-ры., 1959.

7. *Matsushita T.* // Handbook on Synchrotron Radiation. 1983. V. 1. P. 261.
8. *Lin W., Morita S., Uehara Y., Ohmori H.* // International Journal of Abrasive Technology. 2008. V. 1. № 3/4. P. 274. doi 10.1504/IJAT.2008.020562
9. *Akshakhalyan A.D., Chkhalo N.I., Kharitonov A.I.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2001. V. 470. P. 142. doi 10.1016/S0168-9002(01)01027-0
10. *Roche J.M., Elsner R.F., Ramsey B.D., O'Dell S.L., Kolodziejczak J.J., Weisskopf M.C., Gubarev M.V.* // Proc. of SPIE. 2016. V. 9965. P. 99650I-1. doi.10.1117/12.2238171
11. *Zang Y., Li M., Tang S., Gao J., Zhang W., Zhu P.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2017. V. 860. P.13. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.03.053>
12. *Грибко В.В., Маркелов А.С., Трушин В.Н., Чупрунов Е.В.* // ПТЭ. 2018. № 1. С. 136. doi 10.7868/S0032816218010196
13. *Грибко В.В., Маркелов А.С., Трушин В.Н., Чупрунов Е.В.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. № 5. 2017. С. 28. doi 10.7868/S0207352817050079
14. *Погорелов А.В.* Дифференциальная геометрия. М.: Наука, 1974.
15. *Боуэн Д.К., Таннер Б.К.* Высокорастворимая рентгеновская дифрактометрия и топография. М.: Наука, 2002.