

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Андреев А.И., Жуков А.В., Яковешин А.С. Разработка методики в области проектирования мембранных датчиков давления // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 28–34. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.04

Please cite this article in English as:

Andreev A.I., Zhukov A.V., Yakovishin A.S. Development of a methodology for the design of membrane pressure sensors. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 1, pp. 28-34. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.04

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 1, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.04

УДК 621.825

А.И. Андреев, А.В. Жуков, А.С. Яковешин

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ В ОБЛАСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МЕМБРАННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Одними из первичных измерительных приборов являются разнообразные датчики и преобразователи давления. Давление – один из важнейших параметров, контролируемых в технологических процессах практически всех отраслей экономики: предприятиях нефтедобывающего и перерабатывающего комплекса, современной энергетики, в том числе атомной, машиностроении, жилищно-коммунального хозяйства и других отраслей. Во всех этих случаях измерение давления с более высокой точностью повышает достоверность получаемых результатов измерения. Потребность в приборах измерения давления предприятиями развивающейся промышленности постоянно растет и одновременно требует совершенствования их функциональных возможностей, а также повышения точности.

Датчики давления являются одним из наиболее распространенных видов измерительного оборудования, используются для регистрации давления газовых и жидких сред и применяются в качестве одного из важнейших параметров ведения технологических процессов. В статье подробно описан расчет основных элементов датчика давления мембранного типа, а именно расчет упругой, прочностной характеристики мембраны. Представлена методика расчета деформаций пластины круговой формы переменной толщины. При проектировании мембраны использовался новый подход. Расчет датчика давления опирается на полученное техническое задание по изготовлению датчика, предназначенного для работы в определенных условиях. Это связано с тем, что удовлетворить всем требованиям, предъявляемым к материалу мембраны, достаточно сложно, поэтому выбор наиболее подходящего материала зависит от требований, предъявляемых к датчику. Зачастую выбор связан с определенными трудностями, так как немногие материалы имеют одновременно достаточную пластичность и высокую прочностно-упругую характеристику. При выборе материала мембраны приходится ограничиваться удовлетворением лишь наиболее важных требований.

Ключевые слова: деформация, напряжения, условие прочности, мембрана, условие упругости, чувствительный элемент, изгиб, контур, сжатие, растяжение.

A.I. Andreev, A.V. Zhukov, A.S. Yakovishin

Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin, Saratov, Russian Federation

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY
FOR THE DESIGN OF MEMBRANE PRESSURE SENSORS

One of the primary measuring instruments is a variety of pressure transmitters and transducers. Pressure is one of the most important parameters controlled in the technological processes of almost all sectors of the economy: enterprises of the oil-producing and processing complex, modern energy, including nuclear power, mechanical engineering, housing and communal services and other industries. In all these cases, pressure measurement with higher accuracy increases the reliability of the measured results. The demand for pressure measuring devices by enterprises of the developing industry is constantly growing and at the same time requires the development of their functionality, as well as an increase in accuracy.

Pressure transducers are one of the most common types of measuring equipment; they are used to register the pressure of gas and liquid media and are used as one of the most important parameters for conducting technological processes. The article describes in detail the calculation of the main elements of a membrane-type pressure sensor, namely, the calculation of the elastic, strength characteristics of the membrane is described in detail. A method for calculating the deformations of a circular plate of variable thickness is provided. A new approach was taken in the design of the membrane. The calculation of the pressure sensor is based on the received technical assignment for the manufacture of a sensor designed to operate under certain conditions. This is due to the fact that it is quite difficult to meet all the requirements for the membrane material, therefore the choice of the most suitable material depends on the requirements for the sensor. Often, the choice is associated with certain difficulties, since few materials at the same time have sufficient plasticity and high strength and elastic characteristics. When choosing a diaphragm material, one has to confine himself to satisfying only the most important requirements.

Keywords: deformation, stresses, strength condition, membrane, elasticity condition, sensitive element, bending, contour, compression, tension.

Расчет прочности круглой пластинки, заземленной по внешнему контуру

Мембрана – основной элемент датчика давления, представляет собой круглую пластинку которая подвергается различным деформациям. Наиболее простой вид деформации таких элементов – их осесимметричный изгиб. Технические требования, предъявляемые к гофрированной мембране, будут эквивалентны требованиям к самому датчику давления [1–3].

На рис. 1 показано диаметральное сечение круглой пластинки и несколько видов осесимметричных нагрузок.

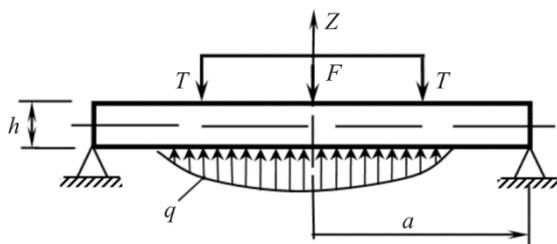


Рис. 1. Схема нагрузок пластины: h – толщина пластинки; a – внешний радиус пластинки; F – сосредоточенная сила в центре пластин; T – кольцевая нагрузка, q – распределенная нагрузка

Срединная плоскость делит толщину пластинки пополам. Вертикальные линейные перемещения точек срединной плоскости (по оси z) называются прогибами и обозначаются буквой w .

Круглая диафрагма в датчике давления опирается по своему контуру на корпус и зажата по краям. Кроме того на нее действует сила давления, равномерно распределенная по площади диафрагмы [4; 5].

Вычисление изгибающих моментов на мембране.

Так как материал пластинки непластичный, то с позиции теории прочности в точках контура:

– при $r = a$ имеем:

$$\sigma_1 = \frac{3qa^2}{4h^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \mu \frac{3qa^2}{4h^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_3 = 0, \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{III}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{3qa^2}{4h^2}. \quad (4)$$

В центре пластинки при $r = 0$ имеем:

$$\sigma_1 = \sigma_1 = (1 + \mu) \frac{3qa^2}{8h^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_3 = 0, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{III}} = \sigma_1 - \sigma_3 = (1 + \mu) \frac{3qa^2}{8h^2}. \quad (7)$$

Сравнивая величины эквивалентных напряжений, заключаем, что наиболее опасной точкой пластинки является та, что расположена на контуре, и тогда условием прочности будет [6]:

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{III}} = \frac{3qa^2}{4h^2} \leq [\sigma]. \quad (8)$$

Расчет упругой характеристики мембраны проектируемого датчика давления

Изгибом называется деформация, при которой ось стержня и все его волокна, т. е. продольные линии, параллельные оси стержня, искривляются под действием внешних сил. Наиболее простой случай изгиба получается тогда, когда внешние силы будут лежать в плоскости, проходящей через центральную ось стержня, и не дадут проекций на эту ось. Такой случай изгиба называют поперечным изгибом. Различают плоский изгиб и косой [6–9].

Плоский изгиб – такой случай, когда изогнутая ось стержня расположена в той же плоскости, в которой действуют внешние силы.

Косой (сложный) изгиб – такой случай изгиба, когда изогнутая ось стержня не лежит в плоскости действия внешних сил.

При плоском поперечном изгибе балок в сечении с системой координат yo_x могут возникать два внутренних усилия – поперечная сила Q_y и изгибающий момент M_x . Далее для них вводятся обозначения Q и M . Если в сечении или на участке балки поперечная сила отсутствует ($Q = 0$), а изгибающий момент не равен нулю или $M = \text{const}$, то такой изгиб принято называть чистым.

Поперечная сила в каком-либо сечении балки численно равна алгебраической сумме проекций на ось y всех сил (включая опорные реакции), расположенных по одну сторону (любую) от проведенного сечения.

Изгибающий момент в сечении балки численно равен алгебраической сумме моментов всех сил (включая и опорные реакции), расположенных по одну сторону (любую) от проведенного сечения относительно центра тяжести этого сечения, точнее, относительно оси, проходящей перпендикулярно плоскости чертежа через центр тяжести проведенного сечения.

Сила Q представляет равнодействующую распределенных по сечению внутренних касательных напряжений, а момент M – сумму моментов вокруг центральной оси сечения X внутренних нормальных напряжений [10–12] (рис. 2).

Поскольку часть волокон растягивается, а часть сжимается, в средней части балки находится слой, волокна которого только искривляются, но

не испытывают ни растяжения, ни сжатия. Такой слой называют нейтральным слоем. Линия, по которой нейтральный слой пересекается с поперечным сечением балки, называется нейтральной линией, или нейтральной осью сечения. Нейтральные линии нанизаны на ось балки.



Рис. 2. Схема деформирования слоев в одном элементе пластины

Линии, проведенные на боковой поверхности элемента пластины перпендикулярно оси, остаются плоскими при изгибе. Эти опытные данные позволяют положить в основу расчета гипотезу плоских сечений. Согласно этой гипотезе сечения элемента пластины, плоские и перпендикулярные к ее оси до изгиба, остаются плоскими и оказываются перпендикулярными изогнутой оси балки при ее изгибе. Поперечное сечение балки при изгибе искажается. За счет поперечной деформации размеры поперечного сечения в сжатой зоне балки увеличиваются, а в растянутой сжимаются [14; 15].

Допущения при расчете деформации пластины мембраны.

1. Продольные волокна друг на друга не давят и, следовательно, под действием нормальных напряжений линейные растяжения или сжатия работают.

2. Деформации волокон не зависят от их положения по ширине сечения. Следовательно, и нормальные напряжения, изменяясь по высоте сечения, остаются по ширине одинаковыми.

3. Элемент пластины имеет хотя бы одну плоскость симметрии, и все внешние силы лежат в этой плоскости.

4. Материал пластины подчиняется закону Гука, причем модуль упругости при растяжении и сжатии одинаков.

5. Соотношения между размерами элемента пластины таковы, что она работает в условиях плоского изгиба без коробления или скручивания.

При чистом изгибе пластины на площадках в ее сечении действуют только нормальные напряжения, определяемые по формуле [16]:

$$\sigma = \frac{M}{J_x} y. \quad (9)$$

где y – координата произвольной точки сечения, отчитываемая от нейтральной линии – главной центральной оси x .

Нормальные напряжения при изгибе по высоте сечения распределяются по линейному закону. На крайних волокнах нормальные напряжения достигают максимального значения, а в центре тяжести сечения равны нулю [17–20].

Характер эпюр нормальных напряжений для симметричных сечений относительно нейтральной линии приведен на рис. 3.

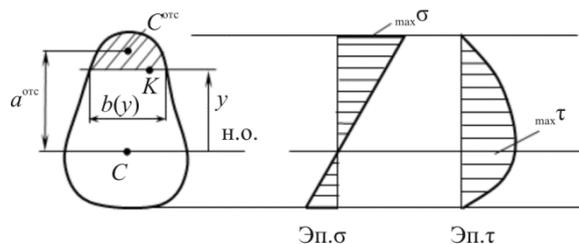


Рис. 3. Эпюры нормальных напряжений при изгибе пластины произвольной формы

Опасными являются точки, наиболее удаленные от нейтральной линии. Для любой точки сечения (точки K) условие прочности элемента пластины по нормальным напряжениям имеет вид:

$$\sigma_{(k)} = \frac{M}{I_{н.о.}} y, \quad (10)$$

где н.о. – это нейтральная ось.

При $y = |y_{\max}|$

$$\max \sigma = \frac{M}{I_{н.о.}} |y_{\max}| = \frac{M}{I_{н.о.} / y_{\max}} = \frac{M}{W_{н.о.}}, \quad (11)$$

где $W_{(н.о.)} = \frac{I_{н.о.}}{y_{\max}}$ – осевой момент сопротивления

сечения относительно нейтральной оси. Момент сопротивления характеризует влияние формы и размеров поперечного сечения на величину напряжений.

Условие прочности по нормальным напряжениям [21]:

$$|\max \sigma| = \frac{|\max M|}{W_{н.о.}}. \quad (12)$$

Методика расчета деформаций пластины круговой формы переменной толщины

В предыдущем разделе приведены основы расчета деформаций чувствительных элементов в форме круговых пластин, имеющих постоянную толщину. Одной из задач является исследование

возможности повышения надежности мембранных чувствительных элементов на основе применения мембран с изменяющейся толщиной пластины. В связи с этим используя описанные выше зависимости, необходимо разработать методику расчета упругой характеристики с изменяющейся толщиной [21; 22].

С этой целью для расчета деформаций пластины датчика давления используем метод конечных элементов. Его сущность сводится к тому, что круглая пластина разбивается на конечное число элементов. Пластина делится на отдельные кольца, а кольца разбиваются на отдельные секторы. В результате получаем $n \cdot m$ кольцевых секторов, где n – число круговых колец; m – число секторов. Схема разбиения круглой пластины на кольцевые секторы приведена на рис. 4.

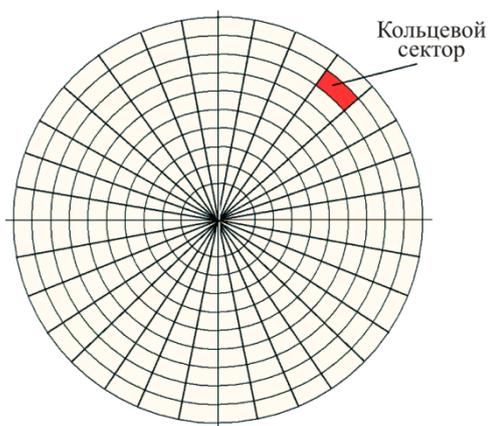


Рис. 4. Схема разбиения пластины на круговые сегменты

Таким образом, круглая пластина разбивается на конечное число круговых секторов. Поскольку для элемента пластины в виде кругового сектора сложно вычислять параметры изгиба, то задачу расчета деформаций упростим путем преобразования кругового кольца в более простую прямоугольную форму. Для приведения элемента пластины в виде кругового кольца к прямоугольной форме необходимо принять критерии равенства [14; 23].

На рис. 4 показана схема приведения элемента пластины в виде кругового сектора к форме в виде прямоугольного элемента. Условие приведения – равенство деформации элементов в диаметральной направлении (см. рис. 4). Считаем, что это условие можно соблюсти, если:

- 1) принять длину прямоугольного элемента, равной диаметральной длине кругового сектора (размер $L = dr$);
- 2) ширину кругового сектора принять из равенства площадей кругового сектора равенству площади прямоугольного элемента.

Тогда ширину прямоугольного элемента (размер H) можно вычислить по формуле

$$H = \frac{u}{2\pi L} (r_0^2 - L^2), \quad (13)$$

где u – угол кругового сектора; r_0 – радиус сектора; L – радиальная длина сектора; $\pi = 3,14$.

При этом толщина элемента кругового сектора и заменяющего элемента в виде прямоугольной формы остается неизменной [25].

Расчет упругой характеристики осуществляем на основе материалов по упругим деформациям тонкостенных пластин круговой формы, приведенных в подразделе ВКР. Под упругой характеристикой понимается зависимость между перемещением измерительной точки упругого элемента и величиной давления. Указанную характеристику определяют способ заделки и форма деформации упругого элемента.

Рассмотрим чувствительный элемент в виде круглой пластины переменной толщины с условно жесткой сердцевиной. Жесткая сердцевина применяется для крепления к ней измерительного накопника, передающего упругие деформации в электронный измерительный блок. Жесткость сердцевины достигается путем утолщения пластины в ее центре. Тогда деформациями сердцевины пластины можно пренебречь [26].

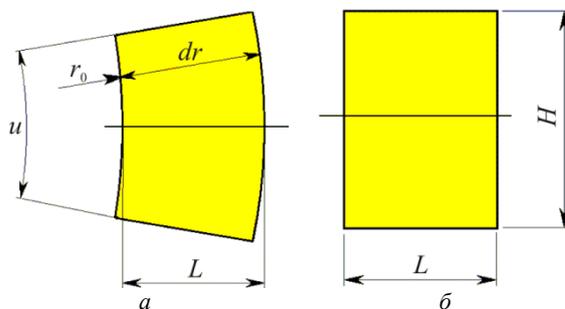


Рис. 5. Круговой сектор (а) и заменяющая его расчетная схема (б) [27]

При делении круговой пластины на конечное число элементов для расчета деформации одного элемента получено следующее выражение [27]:

$$\sigma = \frac{K}{m} \sum_{i=1}^n \frac{PL_i^4}{EI_i}, \quad (14)$$

где σ – относительная деформация упругого элемента (на единицу диаметра мембраны); m – число секторов кругового кольца; n – число круговых колец; P – давление на мембрану; E – модуль упругости материала чувствительного элемента; I_i – осевой момент инерции поперечного сечения сек-

тора; L_i – длина сектора; K – коэффициент приведения размерностей.

Выводы

Описанная методика позволяет рассчитать мембрану для любого датчика давления, применяемого как в промышленности, так и в малой целевой аудитории. Опираясь на предоставленный расчет, можно сделать вывод, что, для проектирования мембраны нужно исходить от первоначальных условий работы датчика. От этого зависит тип мембраны и последующие характеристики датчика.

Список литературы

1. Асташенкова О.Н., Корляков А.В. Контроль физико-механических параметров тонких пленок // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 2. – С. 24–29.
2. Жданов Л.С., Жданов Г.Л. Физика для средних специальных учебных заведений: учебник. – 4-е изд., испр.–М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – С. 109.
3. Ильющин А.А., Ленский В.С., Соппротивление материалов. – М.: Физматгиз, 1959. – 371 с.
4. Асташенкова О.Н. Физико-технологические основы управления механическими напряжениями в тонкопленочных композициях микромеханики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06. – СПб., 2015. – 12 с.
5. Tamulevičius, S. Stress and strain in the vacuum deposited thin films // Vacuum. – 1998. – Vol. 51. – P. 127–139.
6. Механические напряжения в тонких пленках // Обзоры по электронной технике. Серия: Полупроводниковые приборы. – 1981. – Вып. 8 (798). – 63 с.
7. Никифорова-Денисова С.Н., Любушкин Е.Н. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. Кн. 5: Термические процессы: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 96 с.
8. Temperature-dependend optical and mechanical properties of obliquely deposited MgF_2 thin films/ Chuen-Lin Tien, Tsai-Wei Lin, Hung-Da Tzeng, Yi-Jun Jen, Ming-Chung Lui // Indian Journal & Applied Physics. – 2014. – Vol. 52. – P. 117–123.
9. Палатник Л.С., Фукс М.Я., Косевич В.М. Механизм образования и структура конденсированных пленок. – М.: Наука, 1972. – 319 с.
10. Жигальский Г.П. Физические явления в тонких металлических пленках: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГИЭТ (ТУ), 1996. – 193 с.
11. Романов С.А. Механические напряжения в тонких пленках // ЦНИИ «Электроника». – М., 1981. – Вып. 798. – 69 с.
12. Костромин С.В. Низкотемпературная технология получения эпитаксиальных структур карбид кремния на изоляторе на основе композиции $-SiC-AlN$: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06. – СПб., 1997. – 210 с.
13. Гетероструктуры, многослойники и сверхрешетки нелинейных диэлектриков – новая континуальная среда для микроэлектроники нового поколения / В.М. Мухортов,

Ю.И. Головки, С.В. Бирюков, С.И. Масычев, В.Б. Широков, А.В. Анохин // Вестник Южного научного центра – Т. 9: Юбилейный выпуск. – 2013. – С. 37–48.

14. Плазменная технология в производстве СБИС / под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. – М.: Мир, 1987. – 469 с.

15. Технология тонких пленок: справ.: пер. с англ. / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. – М.: Сов. Радио, 1977. – Т. 2. – 768 с.

16. Асташенкова О.Н., Корляков А.В. Контроль физико-механических параметров тонких пленок // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 2. – С. 24–29.

17. Elimination of Stress-Induced Curvature in Thin-Film Structures / Thomas G. Bifano, Harley T. Johnson, P. Bieder, R.K. Mali // Нано- и микросистемная техника. – 2001. – № 6. – С. 32–35.

18. Султонов Ш.Д., Юлдашев Н.Х. Роль внутренних механических напряжений в формировании деформационных характеристик поликристаллических пленок $p-(Bi_{0,5}Sb_{0,5})_2Te_3$ // ФИП PSE. – 2009. – Т. 7, № 1–2. – С. 123–129.

19. Принц В.Я. Нанооболочки и прецизионные наносистемы на основе напряженных гетероструктур: автореф. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.10. – Новосибирск, 2005. – 40 с.

20. Алексеев А.Л. Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой электроники // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т. 1, № 1–2.

21. Пат. 2179458 Рос. Федерация, МПК А61М5/32. Микроигла в интегральном исполнении и способ ее изготовления / Принц А.В., Селезнев В.А., Принц В.Я.; заявитель и патентообладатель Институт физики полупроводников СО РАН, Принц В.Я.- № 99111533/14; заявл. 01.06.1999; опубл. 20.02.2002.

22. Сверхпроводящие пленки иттрий-бариевого купрата, выращенные на напряженных подложках / А.В. Захаров, А.Б. Муравьев, И.С. Позыгун, Г.М. Серопян, С.А. Сычев, Е.А. Яшкевич // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2008. – Т. 3, вып. 4. – С. 25–32.

23. A low actuation voltage electrostatic actuator for RF MEMS switch applications / Chia-Hua Chu, Wen-Pin Shih, Sheng-Yuan Chung, Hsin-Chang Tsai, Tai-Kang Shing and Pei-Zen Chang // J. Micromech. Microeng. – 2007. – Vol. 17. – P. 1649–1656.

24. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции: пер. с англ. / под ред. Дж. Поута, Дж. Мейера. – М.: Мир, 1982. – 576 с.

25. Активные и пассивные механические мембраны на основе композиций широкозонных материалов / А.Н. Кривошеева, О.Н. Асташенкова, А.М. Ефременко, А.В. Матузов // Тезисы докладов VI Международного научного семинара «Карбид кремния и родственные материалы» ISSCRM-2009. – Великий Новгород, 2009. – С. 211–213.

26. Кривошеева А.Н. Пассивные и активные мембраны для устройств микросистемной техники: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01. – М., 2007. – 16 с.

27. Физико-технологические основы формирования высокочувствительных нано и микромембранных элементов. – М., 2013. – 117 с.

References

1. Astashenkova O.N., Korliakov A.V. Kontrol' fiziko-mekhanicheskikh parametrov tonkikh plenok [Control of physical and mechanical parameters of thin films]. *Nano- i mikrosistemnaia tekhnika*, 2013, no. 2, pp. 24–29.
2. Zhdanov L.S., Zhdanov G.L. Fizika dlia srednikh spetsial'nykh uchebnykh zavedenii: uchebnik [Physics for Secondary Special Education Institutions]. 4nd. Moscow: Nauka. Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1984, p. 109.
3. Il'ushin A.A., Lenskii V.S., Soprotivlenie materialov [Material resistance]. Moscow: Fizmatgiz, 1959, 371 p.
4. Astashenkova O.N. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy upravleniia mekhanicheskimi napriazheniiami v tonkopolnochnykh kompozitsiakh mikromekhaniki [Physical-technological basis of mechanical stress control in thin-film compositions of micromechanics]. PhD theses. Saint-Petersburg, 2015, 12 p.
5. Tamulevičius, S. Stress and strain in the vacuum deposited thin films. *Vacuum*, 1998, vol. 51, pp. 127–139.
6. Mekhanicheskie napriazheniia v tonkikh plenkakh [Mechanical stresses in thin films]. *Obzory po elektronnoi tekhnike. Seriia: Poluprovodnikovye pribory*, 1981, iss. 8 (798), 63 p.
7. Nikiforova-Denisova S.N., Liubushkin E.N. Tekhnologiia poluprovodnikovykh priborov i izdelii mikroelektroniki. Kn. 5: Termicheskie protsessy: uchebnoe posobie [Technology of semiconductor devices and microelectronic products]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1989, 96 p.
8. Temperature-dependend optical and mechanical properties of obliquely deposited MgF₂ thin films. Chuen-Lin Tien, Tsai-Wei Lin, Hung-Da Tzeng, Yi-Jun Jen, Ming-Chung Lui. *Indian Journal & Applied Physics*, 2014, vol. 52, pp. 117–123.
9. Palatnik L.S., Fuks M.Ia., Kosevich V.M. Mekhanizm obrazovaniia i struktura kondensirovannykh plenok [Mechanism of formation and structure of condensed films]. Moscow: Nauka, 1972, 319 p.
10. Zhigal'skii G.P. Fizicheskie iavleniia v tonkikh metallicheskh plenkakh [Physical phenomena in thin metal films]. Moscow: Izdatelstvo MGIET (TU), 1996, 193 p.
11. Romanov S.A. Mekhanicheskie napriazheniia v tonkikh plenkakh [Mechanical stresses in thin films]. *TsNII «Elektronika»*. Moscow, 1981, iss. 798, 69 p.
12. Kostromin S.V. Nizkotemperaturnaia tekhnologiia polucheniia epitaksial'nykh struktur karbid kremniia na izolatore na osnove kompozitsii SiC-AlN [Low-temperature technology for epitaxial structures of silicon carbide on insulator based on -SiC-AlN composition]. PhD theses. Saint-Petersburg, 1997, 210 p.
13. Geteorostrukturny, mnogosloiniki i sverkhre-shetki nelineinykh dielektrikov – novaia kontinual'naia sreda dlia mikroelektroniki novogo pokoleniia [Heterostructures, multilayers, and superlattices of nonlinear dielectrics: a new continuum medium for next-generation microelectronics] V.M. Mukhortov, Iu.I. Golovko, S.V. Biriukov, S.I. Masyshev, V.B. Shirokov, A.V. Anokhin. *Iubileinyi vypusk*, 2013, vol. 9, pp. 37–48.
14. Plazmennaiia tekhnologiia v proizvodstve SBIS [Plasma technology in SBIS production]. Ed. N. Ainspruka i D. Brauna, Modcow: Mir, 1987, 469 p.
15. Tekhnologiia tonkikh plenok [Thin Film Technology]. Ed. L. Maissela, R. Glenga. Moscow: Sov. Radio, 1977, vol. 2, 768 p.
16. Astashenkova O.N., Korliakov A.V. Kontrol' fiziko-mekhanicheskikh parametrov tonkikh plenok [Control of physical and mechanical parameters of thin films]. *Nano- i mikrosistemnaia tekhnika*, 2013, no. 2, pp. 24–29.
17. Elimination of Stress-Induced Curvature in Thin-Film Structures. Thomas G. Bifano, Harley T. Johnson, P. Bierden, R.K. Mali. *Nano- i mikrosistemnaia tekhnika*, 2001, no. 6, pp. 32–35.
18. Sultonov Sh.D., Iuldashev N.Kh. Rol' vnutrennikh mekhanicheskikh napriazhenii v formirovaniia deformatsionnykh kharakteristik polikristallicheskh plenok r-(Bi_{0.5}Sb_{0.5})₂Te₃ [The role of internal mechanical stresses in the deformation characteristics of polycrystalline p-(Bi_{0.5}Sb_{0.5})₂Te₃ films]. *FIP PSE*, 2009, vol. 7, no. 1–2, pp. 123–129.
19. Prints V.Ia. Nanoobolochki i pretsizionnye nanosistemy na osnove napriazhennykh geterostruktur [Nanoshells and precision nanosystems based on stressed heterostructures]. Doktors degree dissertation. Novosibirsk, 2005, 40 p.
20. Alekseev A.L. Nanomaterialy i nanotekhnologii dlia sovremennoi poluprovodnikovoi elektroniki [Nanomaterials and nanotechnology for modern semiconductor electronics]. *Rossiiskie nanotekhnologii*, 2006, vol. 1, no. 1–2.
21. Prints A.V., Seleznev V.A., Prints V.Ia. Mikroigla v integral'nom ispolnenii i sposob ee izgotovleniia. Patent no. 2179458 Rossiiskaia Federatsiia (2002).
22. Svrekhpровodiashchie plenki ittrii-bariеvogo kuprata, vyrashchennye na napriazhennykh podlozhkakh [Strain-grown yttrium-barium cuprate films on stressed substrates]. A.V. Zakharov, A.B. Murav'ev, I.S. Pozygun, G.M. Seropian, S.A. Sychev, E.A. Iashkevich. *Vestnik NGU. Seriia: Fizika*, 2008, vol. 3, iss. 4, pp. 25–32.
23. A low actuation voltage electrostatic actuator for RF MEMS switch applications. Chia-Hua Chu, Wen-Pin Shih, Sheng-Yuan Chung, Hsin-Chang Tsai, Tai-Kang Shing and Pei-Zen Chang. *Journal Micromech. Microeng.*, 2007, vol. 17, pp. 1649–1656.
24. Tonkie plenki. Vzaimnaia diffuziia i reaktsii [Thin films. Mutual diffusion and reactions]. Ed. Dzh. Pouta, Dzh. Meiera. Moscow: Mir, 1982, 576 p.
25. Aktivnye i passivnye mekhanicheskie membrany na osnove kompozitsii shirokozonnnykh materialov [Active and passive mechanical membranes based on compositions of broadband materials]. A.N. Krivosheeva, O.N. Astashenkova, A.M. Efremenko, A.V. Matuzov. *Tezisy dokladov VI Mezhdunarodnogo nauchnogo seminaru «Karbid kremniia i rodstvennye materialy» ISSCRM-2009*. Velikii Novgorod, 2009, pp. 211–213.
26. Krivosheeva A.N. Passivnye i aktivnye membrany dlia ustroistv mikrosistemnoi tekhniki [Passive and active membranes for microsystem devices]. PhD. theses. Moscow, 2007, 16 p.
27. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy formirovaniia vysokochuvstvitel'nykh nano i mikromembrannykh elementov [Physical and technological basis for the formation of highly sensitive nano- and micromembrane elements]. Moscow, 2013, 117 p.

Поступила: 25.01.2022

Одобрена: 21.02.2022

Принята к публикации: 22.02.2022

Сведения об авторах

Андреев Александр Игоревич (Саратов, Россия) – аспирант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина (Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая 77, e-mail: aandreew2017@yandex.ru).

Жуков Андрей Владимирович (Саратов, Россия) – бакалавр кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая 77, e-mail: andreizhukov_164@mail.ru).

Яковичин Александр Сергеевич (Саратов, Россия) – преподаватель кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая 77, e-mail: bazilhadance@mail.ru).

About the authors

Alexander I. Andreev (Saratov, Russian Federation) – Postgraduate Student of "Technology and Control Systems in Mechanical Engineering" Department, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin (77, Polytechnicheskaya str., Saratov, 410054, Russian Federation, e-mail: aandreew2017@yandex.ru).

Andrey V. Zhukov (Saratov, Russian Federation) – Bachelor of "Technical mechanics and mechatronics" chair of Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin (77, Polytechnicheskaya str., Saratov, 410054, Russian Federation, e-mail: andreizhukov_164@mail.ru).

Alexander S. Yakovishin (Saratov, Russian Federation) – teacher of the chair "Technology and control systems in mechanical engineering" Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin (77, Polytechnicheskaya str., Saratov, 410054, Russian Federation, e-mail: bazilhadance@mail.ru).

Финансирование. Работа выполнена при поддержке АО «ЭЛКАМ-нефтемаш».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.