

Применение нанотехнологических методов для изготовления пластины маятникового акселерометра

© Г.Р. Сагателян, К.Л. Новосёлов, А.В. Шишлов, С.А. Щукин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены вопросы нанотехнологического обеспечения показателей качества пластин маятниковых акселерометров. Обосновано применение двухсторонней доводки связанным абразивом для обеспечения требуемой плоско-параллельности пластин. Показана возможность формирования выступов и впадин, предусмотренных конструкцией пластины, методом плазмохимического травления. Предложена методика обеспечения равномерной толщины тонкопленочных покрытий, применяемых в качестве маски при плазмохимическом травлении.

Ключевые слова: маятниковый акселерометр, кварцевая пластина, доводка, плазмохимическое травление, ионно-плазменное напыление, магнетронное распыление.

Введение. В качестве основных датчиков, измеряющих ускорения центра масс объекта, а также индикаторов плоскости горизонта гиросtabilизируемых платформ [1] современные системы инерциальной навигации снабжены акселерометрами — приборами, перемещение инерционного элемента которых относительно корпуса ограничено упругой связью. Чувствительный элемент маятникового акселерометра (рис. 1, а), являясь его основной частью, включает маятник, представляющий собой плоскую пластину с закрепленными на ней катушками подвеса, магнитная система которых расположена в корпусе чувствительного элемента. Несущая часть маятника — пластина, выполненная из чистого плавленного кварца (рис. 1, б).

Пластина является особо тонким изделием, изготовленным из хрупкого материала. Кроме того, она содержит сквозные фигурные прорезы, дополнительно снижающие ее прочность. Особенности конструкции кварцевых пластин определяют применение нанотехнологических методов для их изготовления.

Высокие требования по шероховатости ($R_z = 25$ нм), отклонениям от плоскостности и плоско-параллельности сторон (не более 500 нм) обуславливают необходимость создания нового оборудования и технологической оснастки для выполнения операций абразивной доводки и полирования. Конструкции станков для двухсторонней доводки и полирования должны обеспечивать минимальность силового воздействия сепаратора на заготовки. Применяемые для изготовления притиров и полировальников абразивно-инструментальные материалы должны об-

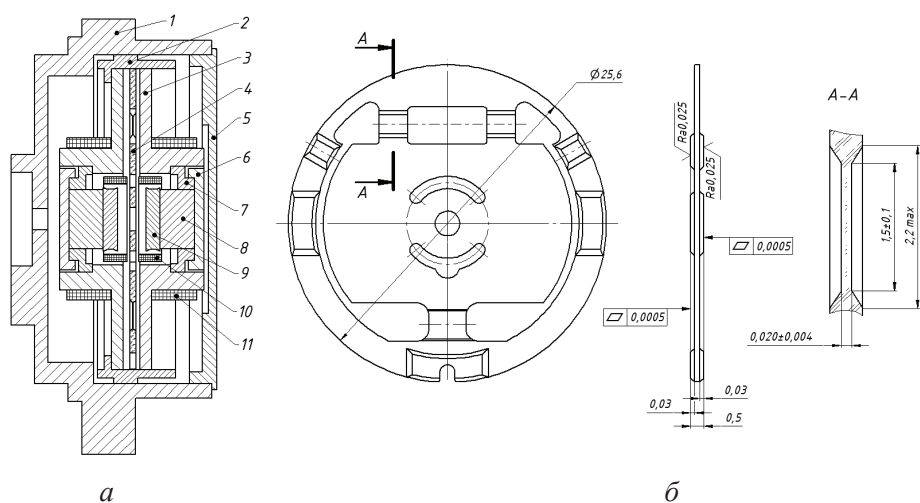


Рис. 1. Конструктивное устройство маятникового акселерометра (а) и его пластины (б): 1, 3 — корпуса; 2 — кольцо; 4 — пластина; 5, 6 — крышки; 7 — втулка; 8 — магнит; 9 — полюсный наконечник; 10, 11 — катушки

ладать высокой контактной жесткостью для обеспечения минимальных отклонений от плоскостности обработанных поверхностей пластины, а также высокими показателями абразивно-полирующего воздействия на кварцевое стекло при минимальных величинах давления в зонах контакта инструмента с заготовками.

Конструкция пластины предусматривает наличие локальных выступов-столбиков высотой 30 мкм. Наиболее эффективным технологическим способом формирования таких столбиков является плазмохимическое травление плавленого кварца через маску, напыленную по тонкопленочной технологии. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость разработки технологии нанесения материала маски, обладающего наивысшей селективностью плазмохимического травления относительно материала пластины — кварца, а также разработки собственно технологии плазмохимического травления кварца на глубину 30 мкм.

Обеспечение точности формы пластины на основе моделирования процесса формообразования при доводке. Доводку и полирование кварцевой пластины производят в сепараторе на двухстороннем доводочном станке эксцентрикового типа [2]. На рис. 2 представлена схема для расчета ожидаемой формы износа рабочей поверхности притира. Предполагается, что точность формы доведенной детали определяется точностями формы (отклонениями от плоскостности) рабочих поверхностей притиров. Необходимо аналитически определить геометрические параметры и кинематические факторы операции доводки, обеспечивающие минимальные отклонения от плоскостности рабочих поверхностей притиров в процессе доводки.

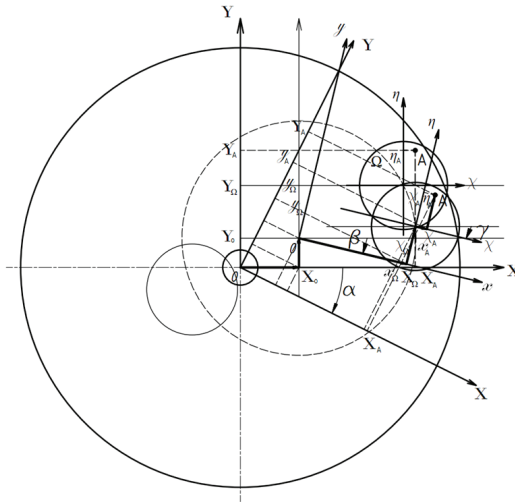


Рис. 2. Схема для расчета ожидаемой формы износа притира

Свяжем с притиром, сепаратором и деталью системы координат XOY , xoy и $x\Omega\eta$ соответственно. Доводке детали соответствует одновременное вращение систем координат: притира — вокруг точки O , сепаратора — вокруг точки o и детали — вокруг точки Ω .

В начальный момент оси OX , ox и Ωx расположены горизонтально. В этот момент выполняется соотношение:

$$\begin{aligned} X_A &= X_O + x_{\Omega} + \chi_A; \\ Y_A &= Y_O + y_{\Omega} + \eta_A. \end{aligned} \quad (1)$$

В текущем положении процесса доводки притир (система координат XOY) повернулся на угол α , сепаратор (система координат xoy) — на угол β , а деталь в гнезде сепаратора (система координат $x\Omega\eta$) — на угол γ . Тогда положение любой точки A обрабатываемой поверхности детали в системе координат притира может быть записано в параметрическом виде как:

$$\begin{aligned} X_A &= X_O \cos \alpha - Y_O \cos(90^\circ - \alpha) + x_{\Omega} \cos(\alpha - \beta) - \\ &- y_{\Omega} \cos[90^\circ - (\alpha - \beta)] + \chi_A \cos(\alpha - \gamma) - \eta_A \cos[90^\circ - (\alpha - \gamma)]; \\ Y_A &= X_O \sin \alpha + Y_O \cos \alpha + x_{\Omega} \sin(\alpha - \beta) + \\ &+ y_{\Omega} \cos(\alpha - \beta) + \chi_A \sin(\alpha - \gamma) + \eta_A \cos(\alpha - \gamma), \end{aligned} \quad (2)$$

или, что то же самое,

$$X_A = X_O \cos \alpha - Y_O \sin \alpha + x_\Omega \cos(\alpha - \beta) - y_\Omega \sin(\alpha - \beta) + \chi_A \cos(\alpha - \gamma) - \eta_A \sin(\alpha - \gamma);$$

$$Y_A = X_O \sin \alpha + Y_O \cos \alpha + x_\Omega \sin(\alpha - \beta) - y_\Omega \cos(\alpha - \beta) + \chi_A \sin(\alpha - \gamma) + \eta_A \cos(\alpha - \gamma).$$

В первом приближении можно предположить наличие прямо пропорциональной зависимости между рассматриваемыми углами, а именно:

$$\beta = k_1 \alpha; \gamma = k_2 \alpha \quad (3)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности.

Тогда:

$$\begin{aligned} X_A &= X_O \cos \alpha - Y_O \sin \alpha + x_\Omega \cos[(1 - k_1)\alpha] - \\ &- y_\Omega \sin[(1 - k_1)\alpha] + \chi_A \cos[(1 - k_2)\alpha] - \eta_A \sin[(1 - k_2)\alpha]; \\ Y_A &= X_O \sin \alpha + Y_O \cos \alpha + x_\Omega \sin[(1 - k_1)\alpha] + y_\Omega \cos[(1 - k_1)\alpha] + \\ &+ \chi_A \sin[(1 - k_2)\alpha] + \eta_A \cos[(1 - k_2)\alpha]. \end{aligned}$$

На основании этой системы уравнений можно найти величину радиус-вектора ρ точки A в системе координат притира:

$$\rho = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}. \quad (4)$$

Кроме того, полученная система уравнений позволяет определить элементарное перемещение dL в зависимости от элементарного приращения $d\alpha$:

$$dL = \sqrt{(dX_A)^2 + (dY_A)^2}, \quad (5)$$

где:

$$\begin{aligned}
 dX_A = & \{ \{ -(X_O \sin \alpha + Y_O \cos \alpha) - (1 - k_1) \{ x_{\Omega} \sin[(1 - k_1)\alpha] + \\
 & + y_{\Omega} \cos[(1 - k_1)\alpha] \} - (1 - k_1) \{ \chi_A \sin[(1 - k_2)\alpha] + \\
 & + \eta_A \cos[(1 - k_2)\alpha] \} \} \} d\alpha; \\
 dY_A = & \{ \{ X_O \cos \alpha - Y_O \sin \alpha + (1 - k_1) \{ x_{\Omega} \cos[(1 - k_1)\alpha] - \\
 & - y_{\Omega} \sin[(1 - k_1)\alpha] \} + (1 - k_2) \{ \chi_A \cos[(1 - k_2)\alpha] - \\
 & - \eta_A \sin[(1 - k_2)\alpha] \} \} \} d\alpha.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Предполагается, что износ рабочей поверхности притира происходит вследствие микроцарапания ее множеством виртуальных микро-резцов, которыми заменяется вся обрабатываемая поверхность детали. Объем изношенного материала притира соответствует суммарному объему всех микроцарапин, а форма износа определяется неравномерностью распределения этого объема по поверхности. С учетом симметричности задачи предполагается, что линейный износ в некоторой кольцевой зоне притира равен частному от деления суммарного объема микроцарапин в пределах этой зоны на ее площадь. Предполагается также, что суммарный объем царапин пропорционален их суммарной длине.

Алгоритм расчета ожидаемой формы износа рабочей поверхности притира заключается в следующем.

1. Задают начальное положение детали. Напомним, что детали находятся в отверстиях сепаратора. В свою очередь, сепаратор лежит на нижнем притире, а верхний притир — на деталях, находящихся в отверстиях сепаратора.

Детали могут быть размещены в сепараторе в один или несколько кольцевых рядов. Находящиеся в одном кольцевом ряде детали оказывают в процессе обработки идентичное истирающее воздействие на рабочую поверхность притира. Поэтому достаточно ограничиться рассмотрением движения только одной детали из каждого кольцевого ряда.

Деталь заменяют сеткой с квадратными ячейками (рис. 3, а), причем размеры элементарной ячейки составляют $d\chi_A$ и $d\eta_A$, а центры элементарных ячеек соответствуют рассматриваемой точке A детали. Расчеты производят для точек A , попавших в пределы контура детали.

Таким образом, для того чтобы начать расчет, необходимо задать величины X_O , Y_O , т. е. положение центра сепаратора относительно центра притира; величины x_{Ω} , y_{Ω} , т. е. положение центра детали относительно центра сепаратора; величины $d\chi_A$, $d\eta_A$, что при заданном размере (диаметре) детали равнозначно заданию количества рассматриваемых ячеек сетки на детали.

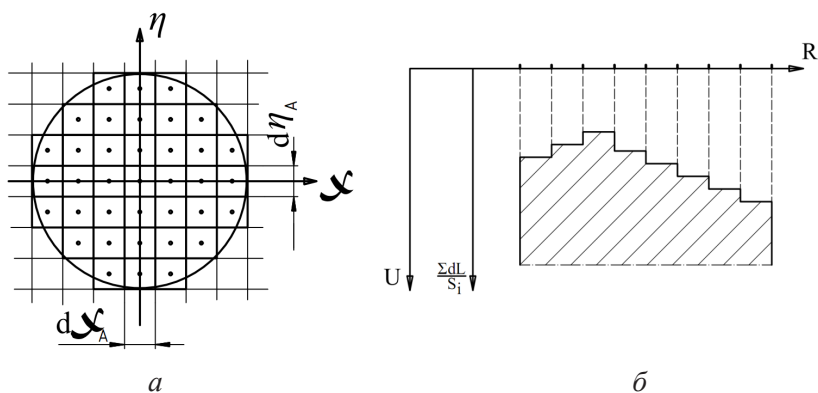


Рис. 3. Разделение детали на элементарные ячейки (а) и построение эпюры ожидаемой формы износа притира (б)

2. Задаются начальным углом $\alpha = 0$ и рассчитывают для первой рассматриваемой точки A ее координаты X_A, Y_A в системе координат притира. На рабочей поверхности притира выделяют кольцевые зоны, количество которых зависит от желаемой точности расчета формы ее износа. Рассчитывают радиус-вектор ρ точки A по формуле (4), тем самым определяя ее положение в одной из выделенных зон.

Задаются дискретой поворота притира $d\alpha$ и рассчитывают величину элементарного перемещения dL рассматриваемой точки A по формуле (5). Полученную величину dL накапливают в той кольцевой зоне рабочей поверхности притира, с которой она была соотнесена.

Производят двойной перебор рассматриваемых точек A вложенными циклами по схеме: $\chi_A = \chi_A + d\chi_A, \eta_A = \eta_A + d\eta_A$. Для каждой рассматриваемой точки A , находящейся в пределах контура детали, по формуле (5) рассчитывают величину элементарного перемещения dL , которая путем суммирования накапливается в соотносимой с соответствующим радиус-вектором ρ кольцевой зоне рабочей поверхности притира. Таким образом, каждое элементарное перемещение каждой из точек детали суммируется в какой-либо из кольцевых зон на рабочей поверхности притира.

3. Сообщают притиру дискрету вращения, т. е. рассматривают его поворот по схеме $\alpha = \alpha + d\alpha$. Для нового взаимного расположения координатных систем притира, сепаратора и заготовки повторяют расчеты элементарных перемещений рассматриваемых точек A с суммированием этих перемещений в пределах выделенных кольцевых зон притира, соответствующих новым положениям рассматриваемых точек.

Этот алгоритм вычислений повторяют до формирования устойчивого графика зависимости накопленных в кольцевых зонах притира перемещений от радиуса R расположения этих кольцевых зон. Эпюрой

ожидаемой формы износа U притира является график, получаемый при делении этих сумм на площади кольцевых зон (рис. 3, б).

Описанная процедура компьютерного моделирования формы износа рабочей поверхности притира позволяет для каждого типоразмера деталей оптимизировать размеры притира, т. е. выбирать его наилучшие внутренний и наружный диаметры. Кроме того, появляется возможность для притиров с оптимальными размерами рабочей поверхности добиваться дополнительной равномерности изнашивания за счет варьирования износостойкостью притира в различных кольцевых зонах — в зонах повышенного расчетного износа применять материал инструмента повышенной износостойкости. При этом в качестве материала притира применяется пористый алмазный композит на органической связке [3].

Обеспечение равномерной толщины тонкопленочных покрытий.

Схема вакуумной установки представлена на рис. 4. Покрытие на деталь наносят с помощью двух одинаковых магнетронов, расположенных симметрично относительно вертикальной (сагиттальной) плоскости.

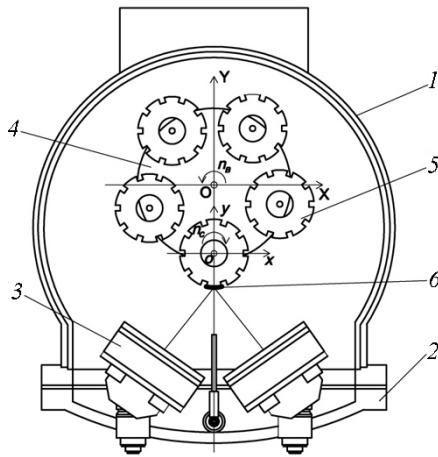


Рис. 4. Схема вакуумной установки мод. UniCOAT 600+: 1 — камера; 2 — дверь камеры; 3 — магнетрон; 4 — водило карусели; 5 — спутник планетарного механизма; 6 — напыляемая деталь

Свяжем с водилом карусели вакуумной установки систему координат XOY , которая совершает вращательное движение с частотой n_b вокруг точки O . С спутником планетарного механизма свяжем систему координат $хоу$, совершающую вращательное движение с частотой n_c вокруг точки o . Деталь располагается параллельно оси $ох$ на расстоянии y_Ω от нее. Распыляемая поверхность магнетрона расположена под углом

θ к фронтальной плоскости на расстоянии D от оси вращения карусели. С источником распыления напыляемого материала, расположенным в точке Ω , свяжем систему координат $\chi\Omega\eta$. Эта точка располагается на расстоянии χ_Ω от оси симметрии вакуумной камеры вдоль оси $\Omega\chi$, соответствующей плоскости мишени.

Предполагаем, что в произвольной точке A поверхности детали толщина покрытия определяется величиной:

$$\xi = K \frac{h_m}{\rho^2} \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon, \quad (7)$$

где K — коэффициент пропорциональности; h_m — максимум диаграммы направленности распыления; ρ — расстояние от источника до рассматриваемой точки; φ — угол направленности, соответствующий рассматриваемой точке A ; ε — угол падения для точки A .

Вначале рассмотрим неподвижное расположение детали (рис. 5). В этом положении оси OX и ox и напыляемая поверхность детали параллельны фронтальной плоскости. Искомые параметры для математической модели, а именно: 1) расстояние ρ от рассматриваемой точки A на поверхности детали до точки Ω на распыляемой поверхности мишени; 2) угол направленности φ от точки Ω на точку A ; 3) угол падения распыляемого вещества на поверхность детали ε — могут быть определены из рассмотрения треугольника $AK\Omega$.

Рассчитаем входящие в формулу (7) величины ρ , φ и ε . Из рассмотрения $\triangle AK\Omega$ имеем:

$$\begin{aligned} \Omega A = \rho &= \sqrt{\Omega K^2 + AK^2 - 2 \cdot AK \cdot \Omega K \cos(90^\circ + \theta)} = \\ &= \sqrt{\Omega K^2 + AK^2 + 2 \cdot AK \cdot \Omega K \sin \theta}, \end{aligned} \quad (8)$$

где θ — угол наклона плоскости мишени к фронтальной плоскости установки, в которой расположена напыляемая поверхность детали. Этот конструктивный параметр установки можно считать заданным.

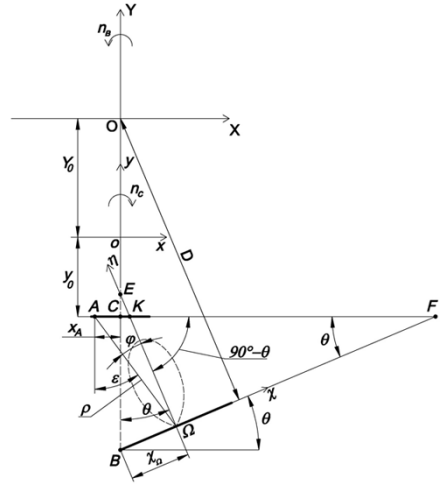


Рис. 5. Схема для расчета распределения толщины покрытия по напыляемой поверхности детали при неподвижном положении детали

Рассчитаем величину ΩK — стороны $\triangle AK\Omega$. Плоскость мишени и фронтальная плоскость пересекаются в точке F . Тогда

$$\Omega K = \Omega F \operatorname{tg} \theta, \quad (9)$$

при этом

$$\Omega F = BF - \chi_{\Omega},$$

причем χ_{Ω} — конструктивный параметр установки, который также можно считать заданным.

Далее имеем:

$$BF = \frac{BC}{\sin \theta} = \frac{BO - (Y_o + y_o)}{\sin \theta} = \frac{\frac{D}{\cos \theta} - (Y_o + y_o)}{\sin \theta},$$

где D — расстояние от плоскости мишени до центра вращения карусели; Y_o — расстояние от центра карусели до оси вращения приспособления детали; y_o — расстояние от оси вращения приспособления детали до напыляемой поверхности. Конструктивные параметры D , Y_o и y_o могут считаться заданными.

Подставляя эти зависимости в формулу (9), имеем:

$$\Omega K = \left[\frac{\frac{D}{\cos \theta} - (Y_o + y_o)}{\sin \theta} - \chi_{\Omega} \right] \operatorname{tg} \theta = \frac{D}{\cos^2 \theta} - \frac{Y_o + y_o}{\cos \theta} - \chi_{\Omega} \operatorname{tg} \theta. \quad (10)$$

Перейдем к расчету величины AK — другой стороны в $\triangle AK\Omega$. Если обозначить через x_A координату текущей рассматриваемой точки A , то имеем:

$$AK = x_A + CK. \quad (11)$$

Очевидно, что

$$CK = EC \operatorname{tg} \theta.$$

При этом

$$EC = BE - BC = \frac{\chi_{\Omega}}{\sin \theta} - \left[\frac{D}{\cos \theta} - (Y_o + y_o) \right].$$

Подставив эти выражения в формулу (11), получаем:

$$AK = x_A + \left\{ \frac{\chi_\Omega}{\sin \theta} - \left[\frac{D}{\cos \theta} - (Y_o + y_o) \right] \right\} \operatorname{tg} \theta. \quad (12)$$

Оказывается, что в $\triangle AK\Omega$ теперь известны три элемента: две стороны, а именно ΩK и AK , и угол между ними. Следовательно, можно определить и остальные — искомые элементы этого треугольника.

Третья сторона в $\triangle AK\Omega$, представляющая собой искомую величину ρ , рассчитывается по формуле (8).

Угол φ (см. рис. 5) может быть определен по известной формуле решения треугольников, которая в данном случае запишется в виде:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{AK \sin(90^\circ + \theta)}{K\Omega - AK \cos(90^\circ + \theta)}.$$

После тождественных преобразований получаем:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{AK \cos \theta}{K\Omega + AK \sin \theta}. \quad (13)$$

Угол ε (см. рис. 5) может быть определен аналогичным образом:

$$\operatorname{tg}(90^\circ - \varepsilon) = \frac{\Omega K \sin(90^\circ + \theta)}{AK - \Omega K \cos(90^\circ + \theta)}.$$

Поэтому

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{AK + \Omega K \sin \theta}{\Omega K \cos \theta}. \quad (14)$$

Определение ожидаемого распределения толщины покрытия вдоль поверхности детали сводится к расчету по формуле (7), в которой величины K и h_m принимают за постоянные, определяемые экспериментально. Входящие в формулу (7) величины ρ , φ и ε рассчитываются по формулам (8), (13) и (14) на основе определения величин AK и $K\Omega$ по формулам (12) и (10). Искомое распределение описывается в итоге графиком $\xi(x_A)$.

Перейдем к рассмотрению возможностей расчета толщины покрытия по формуле (7) при планетарном движении детали. Расчетная схема для этого случая представлена на рис. 6. Такое расположение детали относительно мишени возникает при повороте водила карусели, с ко-

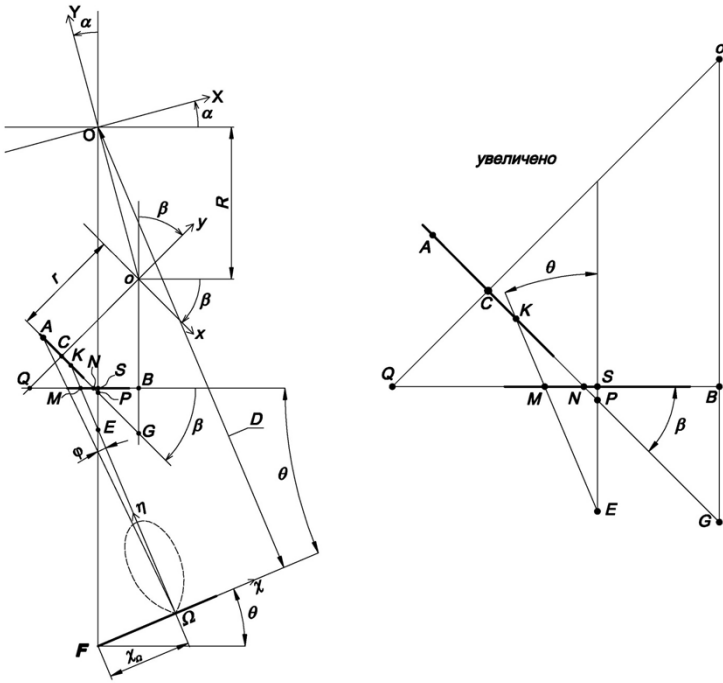


Рис. 6. Схема для расчета распределения толщины покрытия по напыляемой поверхности при планетарном движении детали

торым связана система координат XOY , на угол α против часовой стрелки и одновременном повороте системы координат спутника, с которым связана система координат xoy , на угол β по часовой стрелке. Рассматриваем $\triangle AK\Omega$. Имеем:

$$\varepsilon = 90^\circ - \angle\Omega AK;$$

$$\varphi = \angle A\Omega K;$$

$$\rho = \Omega A.$$

Это и есть искомые величины, входящие в формулу (7).

Далее из рассмотрения того же треугольника найдем значения оставшихся величин, а именно: $\angle AK\Omega$, AK и $K\Omega$.

Получаем, что

$$\angle AK\Omega = 180^\circ - \angle\Omega KP = 180^\circ - \angle EKP,$$

где

$$\begin{aligned} \angle EKP &= \angle MKN = 180^\circ - (\angle MNK + \angle KMN) = \\ &= 180^\circ - [\beta + (180^\circ - \angle SME)] = 180^\circ - \{\beta + [180^\circ - (90^\circ - \theta)]\} = \\ &= 180^\circ - [\beta + (90^\circ + \theta)]. \end{aligned}$$

Тогда

$$\angle AK\Omega = 180^\circ - \{180^\circ - [\beta + (90^\circ + \theta)]\} = \beta + (90^\circ + \theta). \quad (15)$$

Далее переходим к нахождению величины AK . Из рис. 6 видно, что

$$AK = AC + CK, \quad (16)$$

где $AC = x_A$ — текущее положение точки A , которое считаем заданным.

Задача сводится к нахождению величины CK , которую, в свою очередь, можно представить в виде:

$$CK = CN - KN. \quad (17)$$

Из $\triangle QCN$ видно, что

$$CN = QC \operatorname{ctg} \beta,$$

где $QC = oQ - oC$.

Величину $oC = r$ можно считать заданной, так как это радиус расположения деталей на подвижном спутнике, а из $\triangle oBQ$ находим, что

$$oQ = \frac{oB}{\cos \beta},$$

где

$$oB = r + R \cdot (1 - \cos \alpha),$$

причем R — радиус расположения спутников в планетарном механизме карусели. Тогда

$$oQ = \frac{r + R(1 - \cos \alpha)}{\cos \beta}$$

и получаем

$$QC = \frac{r + R(1 - \cos \alpha)}{\cos \beta} - r = \frac{r \cdot \left[1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha) - \cos \beta \right]}{\cos \beta}.$$

Таким образом, формула для вычисления CN приобретает следующий вид:

$$CN = r \frac{\left[1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha) - \cos \beta \right]}{\cos \beta} \operatorname{ctg} \beta = r \frac{\left[1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha) - \cos \beta \right]}{\sin \beta}. \quad (18)$$

Далее нужно решить треугольник MNK , чтобы найти из него искомую величину стороны KN . Углы этого треугольника нам известны:

$$\angle KNM = \beta;$$

$$\angle KMN = 180^\circ - \angle SME = 180^\circ - (90^\circ - \theta) = 90^\circ + \theta;$$

$$\angle MKN = 180^\circ - \beta - (90^\circ + \theta) = 90^\circ - (\beta + \theta).$$

Для определения KN из MNK мы должны знать величину

$$MN = MS - NS. \quad (19)$$

Найдем первую составляющую MS . Считаем заданными расстояния: D — от плоскости излучателя до центра карусели и χ_Ω — от оси установки до источника напыляемого материала. Тогда расстояние SF определится как

$$SF = \frac{D}{\cos \theta} - (R + r)$$

и далее

$$SE = SF - EF = \frac{D}{\cos \theta} - (R + r) - \frac{\chi_\Omega}{\sin \theta} = \frac{D \sin \theta - \chi_\Omega \cos \theta}{\sin \theta \cos \theta} - (R + r)$$

и

$$\begin{aligned} MS = SE \operatorname{tg} \theta &= \frac{D \sin \theta - \chi_\Omega \cos \theta}{\cos^2 \theta} - (R + r) \operatorname{tg} \theta = \\ &= \frac{D \sin \theta - \chi_\Omega \cos \theta - (R + r) \sin \theta \cos \theta}{\cos^2 \theta} \end{aligned}$$

Теперь найдем вторую составляющую NS величины MN , которая определяется как

$$NS = NB - SB.$$

В свою очередь

$$NB = NG \cos \beta;$$

$$NG = CG - CN,$$

причем величина CN определяется по формуле (18),

$$CG = oC \cdot \operatorname{tg} \beta = r \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

Тогда

$$\begin{aligned} NG &= r \operatorname{tg} \beta - \frac{r \left[1 + \frac{R}{r} (1 - \cos \alpha) - \cos \beta \right]}{\sin \beta} = \\ &= r \cdot \frac{\sin^2 \beta - \cos \beta - \frac{R}{r} (1 - \cos \alpha) \cos \beta + \cos^2 \beta}{\cos \beta \sin \beta} = \\ &= r \frac{1 - \cos \beta - \frac{R}{r} (1 - \cos \alpha) \cdot \cos \beta}{\cos \beta \sin \beta} = r \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r} (1 - \cos \alpha) \right) \cos \beta}{\cos \beta \sin \beta} \end{aligned}$$

и получаем

$$NB = r \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r} (1 - \cos \alpha) \right) \cos \beta}{\sin \beta}.$$

Очевидно, что $SB = R \sin \alpha$, тогда

$$NS = r \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r} (1 - \cos \alpha) \right) \cos \beta}{\sin \beta} - R \sin \alpha.$$

В итоге получается, что

$$MN = \frac{D \sin \theta - \chi_{\Omega} \cos \theta - (R+r) \cos \theta \sin \theta}{\cos^2 \theta} -$$

$$- r \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha)\right) \cos \beta}{\sin \beta} + R \sin \alpha. \quad (20)$$

Теперь, зная в $\triangle MNK$ сторону MN , можем определить и сторону KN по теореме синусов:

$$\frac{MN}{\sin \angle MKN} = \frac{KN}{\sin \angle KMN} \quad \text{или} \quad \frac{MN}{\sin [90^\circ - (\beta + \theta)]} = \frac{KN}{\sin (90^\circ + \theta)},$$

т. е.

$$\frac{MN}{\cos(\beta + \theta)} = \frac{KN}{\cos \theta},$$

откуда

$$KN = \frac{MN \cos \theta}{\cos(\beta + \theta)}.$$

Подставив значение MN по формуле (20), получаем

$$KN = \frac{D \cdot \sin \theta - \chi_{\Omega} \cos \theta - (R+r) \cos \theta \sin \theta}{\cos \theta \cos(\beta + \theta)} -$$

$$- r \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha)\right) \cos \beta}{\sin \beta \cdot \cos(\beta + \theta)} \cos \theta + \frac{R \sin \alpha \cos \theta}{\cos(\beta + \theta)}. \quad (21)$$

Таким образом, формула (17) для промежуточной искомой величины CK принимает следующий вид:

$$CK = r \frac{\left[1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha) - \cos \beta\right]}{\sin \beta} - \frac{D \cdot \sin \theta - \chi_{\Omega} \cos \theta - (R+r) \cos \theta \sin \theta}{\cos \theta \cos(\beta + \theta)} +$$

$$+ r \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha)\right) \cos \beta}{\sin \beta \cos(\beta + \theta)} \cos \theta - \frac{R \sin \alpha \cos \theta}{\cos(\beta + \theta)}. \quad (22)$$

Подставив значение CK , вычисляемое по (22), в формулу (16) для расчета AK , получаем:

$$\begin{aligned}
 AK &= x_A + r \frac{\left(1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha) - \cos \beta\right)}{\sin \beta} - \\
 &\quad - \frac{D \sin \theta - \chi_{\Omega} \cos \theta - (R + r) \cos \theta \sin \theta}{\cos \theta \cos(\beta + \theta)} + \\
 &\quad + r \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha)\right) \cos \beta}{\sin \beta \cos(\beta + \theta)} \cos \theta - \frac{R \sin \alpha \cos \theta}{\cos(\beta + \theta)} = \\
 &= x_A + \frac{r}{\sin \beta} \left(1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha) - \cos \beta + \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha)\right) \cos \beta}{\cos(\beta + \theta)} \cos \theta\right) - \\
 &\quad - \frac{1}{\cos(\beta + \theta)} (D \operatorname{tg} \theta - \chi_{\Omega} - (R + r) \sin \theta + R \sin \alpha \cos \theta).
 \end{aligned} \tag{23}$$

Теперь ищем расстояние $K\Omega$, которое состоит из трех частей:

$$K\Omega = KM + ME + E\Omega. \tag{24}$$

Величину KM можно определить из решенного ранее $rMNK$. На данный момент в нем известны величины MN и KN , а также все углы. По теореме синусов имеем:

$$\frac{KM}{\sin \beta} = \frac{KN}{\sin \angle KMN} \quad \text{и} \quad \frac{KM}{\sin \beta} = \frac{KN}{\sin(90^\circ + \theta)},$$

откуда

$$KM = KN \frac{\sin \beta}{\cos \theta}.$$

Подставляя ранее найденное значение KN , имеем:

$$\begin{aligned}
 KM &= \frac{(D \cdot \sin \theta - \chi_{\Omega} \cos \theta - (R + r) \cos \theta \cdot \sin \theta) \sin \beta}{\cos^2 \theta \cos(\beta + \theta)} - \\
 &\quad - r \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r}(1 - \cos \alpha)\right) \cos \beta}{\cos(\beta + \theta)} + \frac{R \sin \alpha \sin \beta}{\cos(\beta + \theta)}.
 \end{aligned} \tag{25}$$

Величину $E\Omega$ можно определить из $\triangle EFO$ при известных χ_Ω и θ :

$$E\Omega = \chi_\Omega \cdot \operatorname{ctg}\theta. \quad (26)$$

Из этого же треугольника видно, что

$$EF = \frac{\chi_\Omega}{\sin\theta}.$$

Тогда

$$SE = \frac{D}{\cos\theta} - (R+r) - \frac{\chi_\Omega}{\sin\theta}.$$

Величина ME может быть определена из $\triangle MSE$ как

$$ME = \frac{SE}{\cos\theta} = \frac{D}{\cos^2\theta} - \frac{R+r}{\cos\theta} - \frac{\chi_\Omega}{\sin\theta\cos\theta}. \quad (27)$$

Таким образом, подставив выражения (25), (26) и (27) в формулу (24), искомую величину $K\Omega$ определяем как

$$\begin{aligned} K\Omega = & \frac{(D \cdot \sin\theta - \chi_\Omega \cos\theta - (R+r)\cos\theta\sin\theta)\sin\beta}{\cos^2\theta\cos(\beta+\theta)} - \\ & -r \frac{1 - \left(1 + \frac{R}{r}(1 - \cos\alpha)\right)\cos\beta}{\cos(\beta+\theta)} + \frac{R\sin\alpha\sin\beta}{\cos(\beta+\theta)} + \\ & + \frac{D}{\cos^2\theta} - \frac{R+r}{\cos\theta} - \frac{\chi_\Omega}{\sin\theta\cos\theta} + \chi_\Omega \operatorname{ctg}\theta. \end{aligned} \quad (28)$$

Теперь есть возможность определить искомые величины. Радиус-вектор ρ определяем по теореме косинусов из $\triangle AK\Omega$, в котором в соответствии с формулами (23) и (28) известны величины сторон AK и $K\Omega$, а также угол $\angle AK\Omega = \beta + (90^\circ + \theta)$ между ними:

$$\begin{aligned} \rho = A\Omega = & \sqrt{AK^2 + K\Omega^2 - 2AKK\Omega \cdot \cos\angle AK\Omega} = \\ = & \sqrt{AK^2 + K\Omega^2 - 2 \cdot AK \cdot K\Omega \cdot \cos(\beta + (90^\circ + \theta))} = \\ = & \sqrt{AK^2 + K\Omega^2 + 2AKK\Omega \cdot \sin(\beta + \theta)}. \end{aligned} \quad (29)$$

Угол направленности φ определяем по теореме синусов из того же треугольника:

$$\frac{AK}{\sin \varphi} = \frac{\rho}{\sin \angle AK\Omega},$$

откуда

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{AK}{\rho} \sin \angle AK\Omega = \frac{AK}{\rho} \sin(\beta + (90^\circ + \theta)) = \\ &= \frac{AK \cdot \cos(\beta + \theta)}{\sqrt{AK^2 + K\Omega^2 + 2 \cdot AK \cdot K\Omega \cdot \sin(\beta + \theta)}} \end{aligned}$$

и в итоге

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{AK \cos(\beta + \theta)}{\sqrt{AK^2 + K\Omega^2 + 2AK \cdot K\Omega \cdot \sin(\beta + \theta)}} \right). \quad (30)$$

Угол падения ε определим также, по теореме синусов из того же треугольника:

$$\frac{\Omega K}{\sin(90^\circ - \varepsilon)} = \frac{\rho}{\sin \angle AK\Omega},$$

откуда

$$\sin(90^\circ - \varepsilon) = \cos \varepsilon = \frac{\Omega K}{\rho} \sin \angle AK\Omega = \frac{\Omega K}{\rho} \sin(\beta + (90^\circ + \theta)),$$

т. е.

$$\cos \varepsilon = \frac{\Omega K}{\sqrt{AK^2 + K\Omega^2 + 2 \cdot AK \cdot K\Omega \cdot \sin(\beta + \theta)}} \cdot \cos(\beta + \theta)$$

и

$$\varepsilon = \arccos \left(\frac{\Omega K \cdot \cos(\beta + \theta)}{\sqrt{AK^2 + K\Omega^2 + 2 \cdot AK \cdot K\Omega \cdot \sin(\beta + \theta)}} \right). \quad (31)$$

Методика расчета ожидаемой формы распределения толщины покрытия по напыляемой поверхности сводится к следующему.

Как можно видеть из уравнения (31), угол поворота сателлита β имеет свою область определения. Действительно, для осуществления процесса напыления должно выполняться условие:

$$-90^\circ < \beta + \theta < 90^\circ,$$

откуда следует, что

$$-(90^\circ + \theta) < \beta < 90^\circ - \theta.$$

Поскольку между частотами вращения сателлита и карусели установки имеется жесткая кинематическая связь, то существует соотношение $\beta = k\alpha$ и областью определения аргументов полученных математических моделей является диапазон

$$-\frac{90^\circ + \theta}{k} < \alpha < \frac{90^\circ - \theta}{k}. \quad (32)$$

Напыляемую поверхность детали делят на отрезки, количество которых соответствует задаваемой точности расчета ожидаемой формы распределения толщины покрытия. За расчетные точки A принимают середины отрезков. Расчет начинают с положения, при котором углу α соответствует его нижнее граничное значение из области определения (32). Для этого положения по формуле (7) вычисляют ожидаемую толщину напыляемого покрытия во всех рассматриваемых точках A , сохраняя результаты в виде массива. Входящие в формулу (7) величины ρ , φ и ε при этом рассчитывают по формулам (29), (30) и (31), причем используемые в них величины AK и $K\Omega$ определяют по формулам (23) и (28).

Далее задаются элементарным приращением $d\alpha$ и осуществляют рекуррентную замену $\alpha = \alpha + d\alpha$ для каждого из значений α , повторяя описанную выше процедуру. Полученные значения приращений толщины покрытия в рассматриваемых точках A накапливают, представляя соответствующие элементы массива в виде накопленных сумм. Вычисления заканчивают, когда текущее значение угла α становится больше верхней границы области определения (32). Искомое расчетное распределение толщины напыляемого покрытия по поверхности детали описывается графиком, сформированным элементами рассматриваемого массива точек A .

Формирование макрорельефа пластины плазмохимическим травлением. Плазмохимическое травление (ПХТ) оптического стекла

марки КУ-1, представляющего собой плавный кварц, производили на установке Caroline 15 PE [5] в лаборатории голографии МГТУ им. Н.Э. Баумана (начальник лаборатории д.т.н., профессор Одинокоев С.Б.). Изготовили три образца диаметром 15 мм и толщиной 1 мм, а также один образец диаметром 30 мм и толщиной 0,5 мм, полированные с двух сторон. На одну из сторон образцов диаметром 15 мм методом ионно-плазменного напыления с магнетронным распылением были нанесены сплошные слои тонкопленочных покрытий: на два образца был нанесен хром, а на третий (для сравнения) — применяемое в отрасли износостойкое покрытие TiAl (титан-алюминиевая композиция). На образец диаметром 30 мм покрытие TiAl было нанесено в виде островков квадратной формы размером 1×1 мм для формирования в процессе ПХТ выступов-столбиков — аналогов соответствующих элементов конструкции пластины (см. рис. 1, б).

На хромовое и титан-алюминиевое («тиал») покрытия образцов диаметром 15 мм были нанесены царапины таким образом, что покрытие было процарапано насквозь без повреждения собственно кварца. При помощи профилографа-профилометра по нанесенным царапинам была определена толщина нанесенных слоев. Для хрома она составила $h_{\text{исх Cr}} = 920$ нм, а для покрытия «тиал» — $h_{\text{исх TiAl}} = 9,5$ мкм.

Операцию ПХТ производили, используя в качестве химически активного газа фреон CF_4 . Применяли режим травления с подачей на антенну мощности $P_a = 250 \dots 450$ Вт. Напряжение автосмещения на столбе составляло $U_{\text{см}} = 60 \dots 90$ В. Поддерживали в камере вакуум на уровне $p = 1$ Па. Продолжительность каждого процесса составляла 15 мин, так как при большем времени происходило значительное загрязнение плазмы, что приводило к росту полимерной пленки на обрабатываемой поверхности образца. Глубину травления определяли повторным профилографированием.

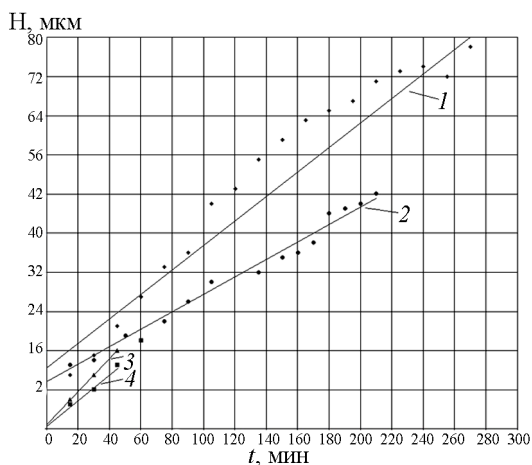


Рис. 7. Зависимости глубины травления плавного кварца через маски из материала «Тиал» (процарапанного (1) и в виде островков (2)); а также хрома (3, 4) от продолжительности операции ПХТ при мощности на антенне $P_a = 250$ Вт (1, 2); $P_a = 300$ Вт (3) и $P_a = 450$ Вт (4)

Результаты ПХТ кварца через исследованные материалы масок представлены на рис. 7.

Глубина травления кварца через хромовую маску составляет $H = 17$ мкм. Это значит, что тонкопленочное хромовое покрытие, при использовании в качестве материала маски, характеризуется селектив-

ностью травления относительно кварца $r = \frac{H}{h_{\text{исх}}} = \frac{17}{0,92} \approx 18,5$.

Следовательно, для получения глубины травления, обеспечивающей заданную чертежом детали — пластины акселерометра — высоту столбиков $H = 30$ мкм, необходимо нанести тонкопленочное хромовое покрытие толщиной $h_{\text{исх}} = 1,6$ мкм.

Обеспечение таких толщин тонкопленочного хромового покрытия проблематично. Повысить селективность травления кварца относительно хромовой маски можно за счет оптимизации режимов ПХТ. При этом для получения на порядок больших глубин травления понадобится нанесение тонкопленочного покрытия из хрома толщиной 15...20 мкм.

Перспективным представляется использование в качестве материала маски разработанных в приборостроительной отрасли износостойких тонкопленочных покрытий, в частности исследованного покрытия «Тиал», поскольку в отрасли отлажена технология нанесения этого покрытия толщиной 15...20 мкм на подложки из плавленного кварца.

Действительно, результаты экспериментальных исследований (график 2 на рис. 7) свидетельствуют о том, что выступы высотой 30 мкм на пластине акселерометра (см. рис. 1, б) могут быть сформированы методом ПХТ с использованием в качестве материала маски покрытия «Тиал». Более того, полученные экспериментальные результаты (график 1 на рис. 7) позволяют утверждать, что аналогичным методом могут быть получены и предусмотренные конструкцией той же пластины переключки, формируемые углублениями в 210 мкм.

Выводы. 1. Показано, что доводку пластин маятникового акселерометра с обеспечением отклонений от плоскостности и плоско-параллельности в пределах 500 нм целесообразно производить на двухстороннем доводочном станке эксцентрикового типа в сепараторе. При этом вместо доводки свободным абразивом в качестве инструментального материала рекомендуется применять высокопористый алмазный инструмент на полимерной связке с расчетом ожидаемой формы износа притира по предлагаемой методике.

2. Выступы-столбики высотой 30 мкм, предусмотренные конструкцией пластины акселерометра, целесообразно формировать методом плазмохимического травления через контактную маску, изготовленную методами тонкопленочной технологии из титан-алюминиевого композита «Тиал». Для получения этих же столбиков методом ПХТ через хромовую маску ее толщина должна быть не менее 1,6 мкм. Оптимизация ре-

жимов ПХТ в сочетании с применением тонкопленочной маски из материала «Тиал» в перспективе позволит формировать также перемычки в пластине акселерометра за счет создания углублений глубиной 210 мкм.

3. Для получения требуемых точностных характеристик элементов пластины акселерометра, формируемых плазмохимическим травлением, необходимо обеспечить равномерность толщины тонкопленочного покрытия, используемого в качестве маски. Разработанная методика математического моделирования формирования толщины материала в процессе ионно-плазменного напыления с магнетронным распылением мишени позволяет обеспечить итоговую равномерность покрытия за счет оптимизации геометрических и кинематических факторов.

Работа выполнена в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 218 от 5 апреля 2010 г на основании договора 13.G25.31.0020 между Минобрнауки РФ и ОАО «МЗ «Сапфир» о создании высокотехнологического производства.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2011, № 10. URL: technomag.edu.ru/doc/21957.html.
- [2] Мостяев В.А., Дюжиков В.И. *Технология пьезо- и акустоэлектронных устройств*. Москва, Изд-во «Ягуар», 1993, с. 83–99.
- [3] Кондратенко В.С. *Состав для алмазного инструмента*. Патент № 2169658 Российская Федерация.
- [4] Берлин Е.В., Сейдман Л.А. *Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии*. Москва, Изд-во «Техносфера», 2010, с. 457–488.
- [5] Одинокоев С.Б., Сагателян Г.Р. Технология изготовления дифракционных и голограммных оптических элементов с функциональным микро рельефом поверхности методом плазмохимического травления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*, 2010, № 2, с. 92–104.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сагателян Г.Р., Новоселов К.Л., Шишлов А.В., Щукин С.А. Применение нанотехнологических методов для изготовления пластины маятникового акселерометра. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/805.html>

Сагателян Гайк Рафаэлович родился в 1953 г., с отличием окончил Ереванский Политехнический Институт по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области технологий изготовления прецизионных изделий приборостроения. e-mail: h_sagatelyan@mail.ru

Новосёлов Кирилл Леонидович родился в 1978 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана по специальности «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» в 2004 г. Аспирант кафедры «Технология приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Шишлов Андрей Владимирович родился в 1980 г., с отличием окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана по специальности «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» в 2004 г. Аспирант кафедры «Технология приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Щукин Сергей Алексеевич родился в 1986 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана по специальности «Машины и технологии обработки металлов давлением» в 2009 г. Аспирант кафедры «Технология приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.