

Н.В. Новиков<sup>1</sup>, акад., В.Б. Струтинский<sup>2</sup>, д-р техн.наук, проф., Л.Н. Девин<sup>1</sup>, д-р техн.наук, проф.  
1-НАН Украины, Институт сверхтвердых материалов, г.Киев, Украина;  
2-НТУ Украины «Киевский политехнический институт», г.Киев, Украина

## ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГИЙ ИНСТИТУТА СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МНОГОКООРДИНАТНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЕГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

---

*Рассмотрены конструктивные особенности многокоординатного оборудования и технология изготовления его основных узлов. Определены характерные параметры пространственного движения инструмента и характеристики его стойкости. Выполнено математическое моделирование показателей точности оборудования и даны предложения по его инструментальному обеспечению.*

*The structural features of multicoordinate equipment and technology of making of his basic knots are considered. The characteristic parameters of spatial motion of instrument and description of his firmness are certain. The mathematical design of indexes of exactness of equipment and of suggestion is executed on his instrumental providing.*

---

### **Введение**

Современное обрабатывающее оборудование разрабатывается с использованием комплекса прогрессивных технологических решений [1].

В Институте сверхтвердых материалов НАН Украины разработано ряд прогрессивных технологий получения изделий из материалов различного вида для станкостроительной промышленности. Трансфер данных технологий в смежные отрасли и направления представляет собой актуальную научно-технологическую задачу.

**Постановка проблемы в общем виде** заключается в реализации многокоординатного оборудования. Для этого необходимо создание подвижных шарниров и несущих систем; разработка прогрессивных конструкций инструментов и рациональных алгоритмов их движения; обеспечение необходимых показателей динамического качества оборудования.

Разработка многокоординатного оборудования связана с важными научными и практическими заданиями повышения производительности и качества обработки деталей из неметаллических материалов.

**В настоящее время имеется много исследований и публикаций**, посвященных разработке многокоординатного обрабатывающего оборудования [1, 2]. Они связаны с разработкой схемных решений механизмов, исследованию параметров точности оборудования, конструктивным решениям основных узлов. Публикаций, направленных на использование прогрессивных технологий, реализованных в институте сверхтвердых материалов, в литературных источниках не обнаружено.

**К нерешенным ранее частям общей проблемы** относится разработка конструкции и необходимого технологического обеспечения основных узлов многокоординатного оборудования, определение особенностей динамических режимов пространственных движений инструмента в данном оборудовании и действующих на него нагрузок.

**Целью исследований**, изложенных в данной статье, есть разработка прогрессивных конструкций основных узлов многокоординатного оборудования

Для достижения поставленной цели поставлены и решены задачи исследования рабочих процессов многокоординатного оборудования и разработка на этой основе прогрессивных конструкций основных узлов оборудования и эффективного инструментального обеспечения.

### **Изложение основного материала исследований**

**Конструктивные особенности многокоординатного оборудования и технологии реализации его основных узлов**

Многокоординатные станки со сложным пространственным движением инструмента реализованы на базе пространственных механизмов гексаподов [2]. Выбор и уточнение геометрических параметров станка на основе исследования его динамических свойств является новым подходом при разработке многокоординатного оборудования. Данный метод есть приоритетным научно-техническим результатом Института сверхтвердых материалов.

Платформа 1 станка с инструментом 2, установленным в шпинделе 3, осуществляет пространственное движение (рис. 1).

Пространственное движение включает поступательное перемещение полюса платформы в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и сферическое движение платформы, вокруг полюса которое характеризуется углами Эйлера-Крылова  $A$ ,  $B$ ,  $C$ .

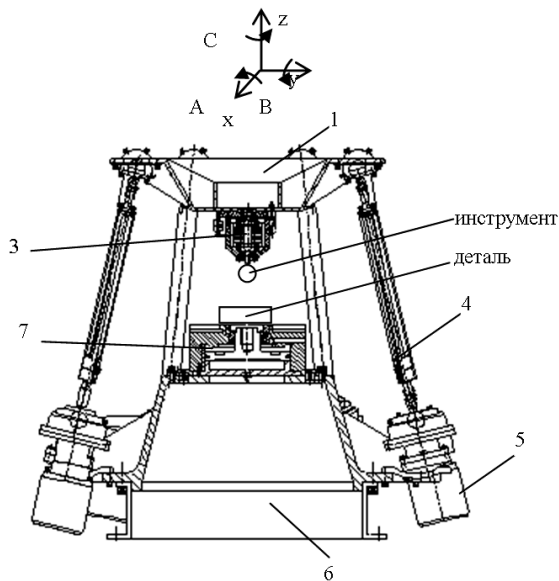


Рис. 1. Разработанное многокоординатное технологическое оборудование типа гексапода

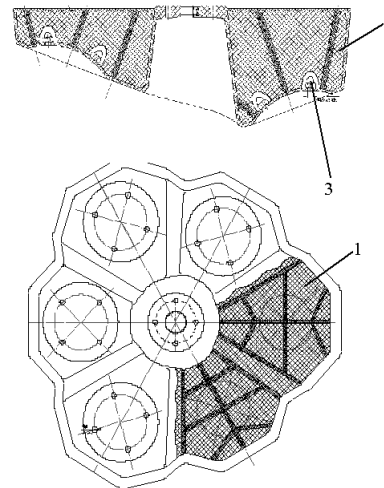


Рис. 2. Конструктивная схема платформы станка, изготовленной из композитных материалов

Каждая подвижная штанга 4 имеет переменную длину и осуществляет пространственные сферические поперечно-угловые перемещения. Изменение длины штанги осуществляется специальными приводами 5, которые установлены на неподвижной платформе 6. Обрабатываемая деталь закрепляется на силовом столе 7.

Динамические режимы работы станка отличаются большой сложностью. Кинематические параметры имеют высокочастотные пульсационные составляющие. При обработке обеспечивается скорость перемещения платформы 2...3 м/с и выше. Ускорение платформы при этом достигает 10...12д. Обеспечение данных ускорений требует значительной мощности приводов, которая в основном определяется силами инерции, возникающими при пространственном перемещении платформы. Проведена оценка инерционных сил, действующих на основные узлы оборудования. Для платформы, изготовленной из стали, эквивалентные силы инерции составляют 5 кН и выше. Реализация приводов, которые при таких нагрузках способны обеспечить необходимое быстродействие, проблематична.

Используя специальные материалы и технологии Института сверхтвердых материалов, удалось снизить величину инерционных нагрузок в 20...30 раз, доведя их до 0,2 кН. Это достигнуто использованием материалов на основе углеродных композитов с сотовым наполнителем и специальной технологией изготовления штанг и платформы (рис. 2).

Платформа имеет оболочку 1 из композита с ребрами жесткости 2. Внутренне пространство платформы заполнено сотовым наполнителем 3. Использована специальная технология формирования и сборки платформы.

С платформой также связаны шарнирные опоры штанг (рис. 3).

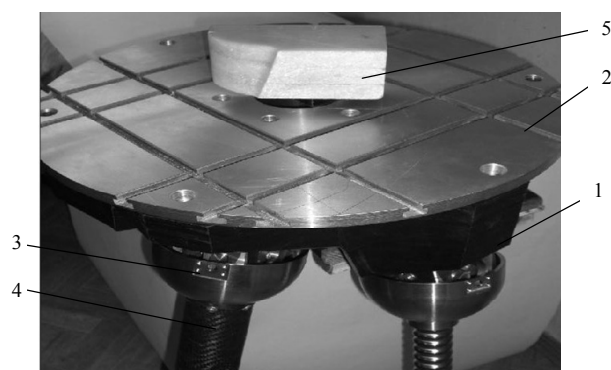


Рис. 3. Разработанная конструкция платформы со штангами многокоординатного оборудования: 1 – платформа; 2 – стол; 3 – сферическая опора; 4 – штанга; 5 – деталь, обработанная на станке

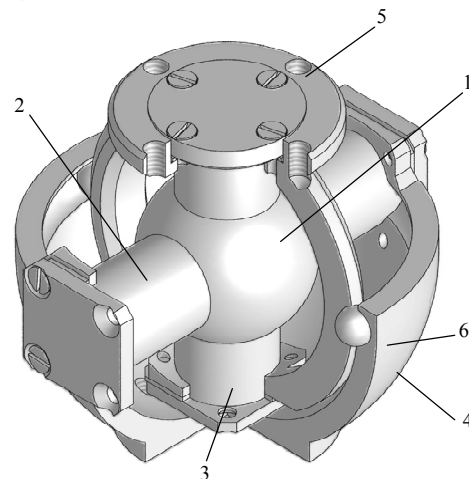


Рис. 4. Конструктивная схема разработанной сферической опоры

На платформе показана деталь из неметаллического материала (камня), имеющая фасонную поверхность, обработанную путем изменения длины только одной из штанг станка.

Основными узлами многокоординатного оборудования есть сферические опоры (рис. 4). При их разработке реализован трансфер технологий Института сверхтвердых материалов.

Сфера 1, изготовлена из карбида бора, имеет отклонение от сферичности 1 мкм. Со сферой контактируют втулки 2, 3, на поверхностях которых выполнены гидростатические опорные элементы. Втулки закреплены соответственно в корпусе 4 и крышке 5 сферической опоры. Для передачи крутящего момента служит шарик 6 из твердого сплава, который перемещается в канавке корпуса. Испытание опытного образца опоры подтвердили высокую точность и жесткость конструкции.

Штанги станка изготовлены из углеродного композита по специальной технологии аналогичной технологии изготовления платформы.

#### Характерные параметры динамического пространственного движения инструмента

Инструмент совершает сложное пространственное движение. Его основными составляющими есть вращения. Пространственные поперечно-угловые перемещения инструмента описываются дифференциальными уравнениями сферического движения [3].

$$\frac{d\vec{L}}{dt} + \vec{\omega} \cdot \vec{L} = \vec{M}, \quad (1)$$

где  $\vec{L}$  – вектор кинетического момента платформы;  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости платформы;  $\vec{M}$  – вектор главного момента сил, который действует на платформу.

В проекциях на оси координат уравнения пространственного движения инструмента имеют вид

$$\frac{dL_x}{dt} + \omega_y L_z - \omega_z L_y = M_x, \quad \frac{dL_y}{dt} + \omega_z L_x - \omega_x L_z = M_y, \quad \frac{dL_z}{dt} + \omega_x L_y - \omega_y L_x = M_z, \quad (2)$$

где  $M_x, M_y, M_z$  – проекции на оси координат  $x, y, z$  главного момента сил резания, которые действуют на платформу  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекции угловой скорости;  $L_x, L_y, L_z$  – проекции кинетического момента.

Кинетический момент представляет собой произведение тензора инерции ( $I_{ij}$ ) на вектор угловой скорости:

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega} \quad (3)$$

Проекции кинетического момента определяются зависимостями:

$$L_x = I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{zx}\omega_z, \quad L_y = -I_{xy}\omega_x + I_{yy}\omega_y - I_{yz}\omega_z, \quad L_z = -I_{zx}\omega_x - I_{zy}\omega_y + I_{zz}\omega_z \quad (4)$$

Подвижная платформа станка и связанные с ней шарнирные опоры штанг представляют сложную конструкцию, состоящую из десятков деталей, соединенных между собой. Платформа, изготовленная из композита, имеет малую массу, поэтому масса деталей шарниров сравнима с массой платформы. На платформе установлен шпиндель с инструментом, которые тоже являются сложной механической системой. В процессе работы оборудования на указанные системы действуют интенсивные динамические нагрузки. Под действием нагрузок происходит деформация и взаимное смещение деталей. Поэтому, распределение масс платформы, а соответственно и тензор инерции имеют ограниченные изменения во времени случайного характера. Тензор инерции платформы ( $I_{ij}$ ) является симметричным, поэтому  $I_{yx} = I_{xy}, I_{yz} = I_{zy}, I_{zx} = I_{xz}$ . Компоненты тензора найдены на основе специальных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.

Тензор инерции определен в центральных осях отвечающих центру масс динамической системы платформы. Под воздействием динамических нагрузок имеет место перемещение и деформация отдельных деталей платформы. Это приводит к случайным значениям положения центра масс платформы. Случайные изменения положения центра масс платформы определены соотношениями

$$x_c = \frac{\sum_{k=1}^N m_k x_m^k}{m_0 + \sum_{k=1}^N m_k}, \quad y_c = \frac{\sum_{k=1}^N m_k y_m^k}{m_0 + \sum_{k=1}^N m_k}, \quad z_c = \frac{\sum_{k=1}^N m_k z_m^k}{m_0 + \sum_{k=1}^N m_k^*} \quad (5)$$

где  $m_0$  – масса несущей системы подвижной платформы;  $m_k$  – масса отдельных деталей шарниров и шпиндельного узла, влияние которых на инерционные свойства платформы является существенным;  $x_m^k, y_m^k, z_m^k$  – перемещение во времени координат центров масс отдельных деталей, определенных в локальной системе координат, связанной с подвижной платформой.

В соответствии с определенным центром масс (5) найдены компоненты тензора инерции подвижной платформы. В абсолютной системе координат компоненты тензора инерции определены зависимостями

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \sum_{k=1}^N I_x^k + m_0[(y_c + y)^2 + (z_c + z)^2] + m_k^* \left[ \left( y_m^k - y_c - y \right)^2 + \left( z_m^k - z_c - z \right)^2 \right], \\ I_{yy} &= \sum_{k=1}^N I_y^k + m_0[(x_c + x)^2 + (z_c + z)^2] + m_k^* \left[ \left( x_m^k - x_c - x \right)^2 + \left( z_m^k - z_c - z \right)^2 \right], \\ I_{zz} &= \sum_{k=1}^N I_z^k + m_0[(x_c + x)^2 + (y_c + y)^2] + m_k^* \left[ \left( x_m^k - x_c - x \right)^2 + \left( y_m^k - y_c - y \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (6)$$

$$I_{xy} = \sum_{k=1}^N I_{xy}^k + \sum_{k=1}^N m_k (x_m^k - x_c - x)(y_m^k - y_c - y), \quad I_{yz} = \sum_{k=1}^N I_{yz}^k + \sum_{k=1}^N m_k (y_m^k - y_c - y)(z_m^k - z_c - z)$$

$$I_{xz} = \sum_{k=1}^N I_{xz}^k + \sum_{k=1}^N m_k (x_m^k - x_c - x)(z_m^k - z_c - z).$$

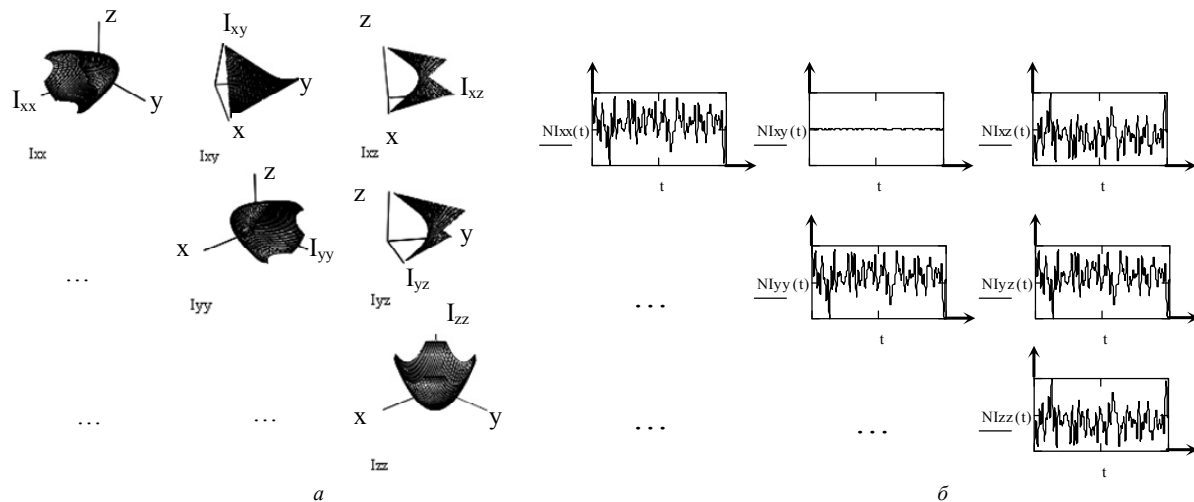
де  $(I_{ij}^k)$  - тензор инерции k-ой детали платформы,  $x, y, z$  переменные во времени деформативные перемещения деталей.

Приведенные зависимости (5), (6) содержат случайные составляющие и определяют тензор инерции платформы в абсолютной системе координат как стохастическое тензорное поле. Оно имеет среднее детерминированное значение в виде математического ожидания и случайные отклонения тензора от указанного среднего значения. Графическая интерпретация детерминированных и случайных составляющих тензорного поля даны в виде набора графиков, которые расположены в виде таблиц (матриц) (рис. 5).

Зависимости, определяющие тензорное поле, использованы при разработке математической модели движения платформы с инструментом.

**Определение случайных нагрузок на станок от сил резания**

Внешними нагрузками на станок являются пространственные силы резания, которые имеют случайный характер. Пространственное перемещение инструмента обуславливает существенные изменения величины и направления силы резания. В результате проведенных исследований получена система уравнений, которая связывает



**Рис. 5. Изображение тензорного поля тензора инерции платформы в виде матриц графиков компонент:**  
*a* – детерминированные составляющие поля; *б* – стохастические составляющие тензорного поля пространственных перемещений платформы  $x, y, z$  и проекции на оси  $x, y, z$  динамической составляющей силы резания  $P_x, P_y, P_z$

$$P_x + T_x \frac{dP_x}{dt} = k_{xx}x + k_{xy}y + k_{xz}z + h_{xx} \frac{dx}{dt} + h_{xy} \frac{dy}{dt} + h_{xz};$$

$$P_y + T_y \frac{dP_y}{dt} = k_{yx}x + k_{yy}y + k_{yz}z + h_{yx} \frac{dx}{dt} + h_{yy} \frac{dy}{dt} + h_{yz};$$

$$P_z + T_z \frac{dP_z}{dt} = k_{zx}x + k_{zy}y + k_{zz}z + h_{zx} \frac{dx}{dt} + h_{zy} \frac{dy}{dt} + h_{zz}.$$

где  $t$  – время;

В систему уравнений входят  $T_x$  и  $h_{xx}$  - постоянные, которые определяют диссипативные составляющие процесса резания;  $k_{xx}$  – постоянные, которые определяют квазистатические характеристики процесса резания.

Пространственное перемещение инструмента представлено в виде случайной полигармонической функции [4], содержащей  $N$  – гармоник.

$$x_i = \left[ \sum_{K=1}^N A_{ik}^* \sin(\omega_{iK}^* t + \psi_{iK}) \right] \quad x_i = x, y, z,$$

где  $A_{ik}^*$  - случайная амплитуда k-ой гармоники;  $\omega_{iK}^*$  - случайная частота гармоник  $b$ ;  $\psi_{iK}$  - начальная фаза гармоники в виде набора случайных чисел.

Для нахождения силы резания, соответствующей входу (8), система уравнений (7) преобразована по Лапласу и найдены передаточные функции системы по силе резания в виде

$$W_{ij}(s) = \frac{P_j(s)}{X_i(s)}, \quad j = x, y, z, \quad X_i = X, Y, Z,$$

где  $s$  - оператор Лапласа.

Передаточные функции приведены к виду частотных передаточных функций  $W(j\omega)$ , где  $j = \sqrt{-1}$  и найдены соответствующие частотные характеристики: амплитудно-частотная  $W_{ij}(\omega) = \text{mod}[W(j\omega)]$  и фазо-частотная  $\psi_{ij}(\omega) = \text{arg}[W(j\omega)]$ . При этом, проекции случайной составляющей силы резания функции времени определены зависимостью

$$P_j = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^N W_{ij}(\omega_{ik}^*) \sin[\omega_{ik}^* t + \psi_{ik}^* + \psi_{ij}(\omega_{ik}^*)] \quad (9)$$

Проведены расчеты случайных составляющих сил резания (9) для типового случая обработки криволинейной поверхности детали с одним рабочим движением в виде изменения длины только одной штанги (рис. 6).

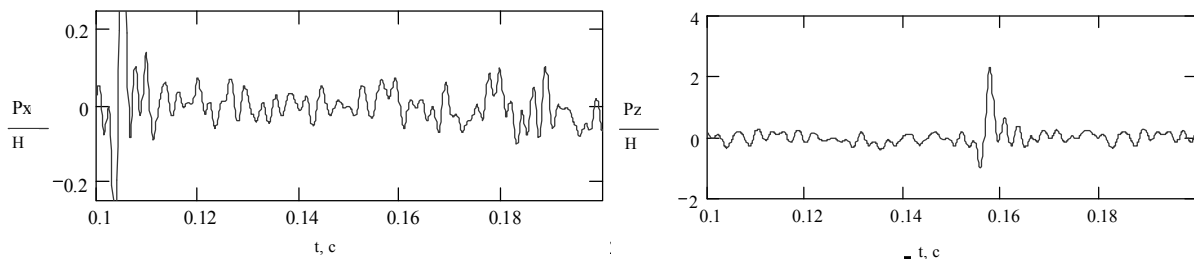


Рис. 6. Реализации значения случайных составляющих проекций силы резания: а – на ось x; б– на ось z

Знание значений случайных составляющих проекций силы резания (рис. 7) позволяет оценить надежность лезвийных инструментов из новых материалов. В Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины для оценки вероятности разрушения инструментов разработан новый оригинальный подход, основанный на анализе дифференциальных функций распределения прочности при растяжении и сжатии инструментального материала ( $S_p$  и  $S_c$ ) и дифференциальных функций распределения напряжений на передней ( $SR_p$ ) и задней ( $SR_z$ ) гранях инструмента [5]. Суть метода определения вероятности разрушения заключается в вычислении интеграла (площади) взаимного пересечения дифференциальных функций пересечения  $J$  [7] – см. рис.7. Как видно из рисунка, общая площадь под кривыми  $f(SR)$  и  $f(Sp)$  (вероятность разрушения резца) будет равна:

$$J = J1 + J2 = \int_0^{S_A} f(S_P) dS + \int_{S_A}^{\infty} f(S_R) dS.$$

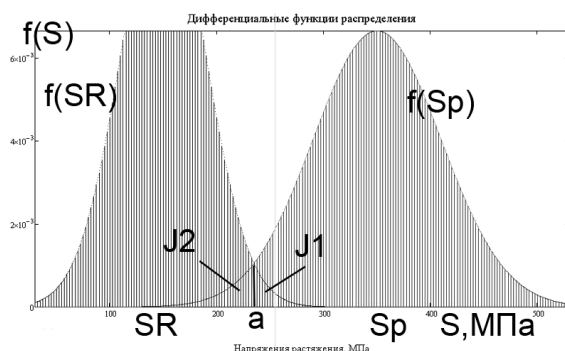


Рис 7. Дифференциальные функции распределения прочности инструментального материала  $f(Sp)$  и напряжений на гранях резца  $f(SR)$

Для расчетов функций  $f(Sp)$  необходимо задать среднее арифметическое значение прочности инструментального материала ( $S_p$ ) и ее среднее квадратическое отклонение (СКО  $S_p$ ). Тогда в предположении, что закон распределения известен (например, нормальный или другой известный) можно однозначно определить функцию  $f(Sp)$  – для предела прочности при растяжении и  $f(S_c)$  – для предела прочности при сжатии.

Аналогично для вычисления дифференциальных функций распределения напряжений  $f(SR)$  необходимо определить среднее значение напряжений в опасных точках на гранях инструмента  $SR$  и их среднее квадратические отклонения СКО  $SR$ . Методика определения напряжений на передней и задней гранях резца по величине составляющих силы резания и их дисперсии

описана в научной литературе [5].

Для выполнения расчетов действующих напряжений и вероятности разрушения резцов по описываемой методике в ИСМ была разработана программа «VarTool».

Исходные данные, необходимые пользователю для расчета:  $A$  – Характеристики инструментального материала:  $S_p$  и  $S_c$  – средние значения прочности при растяжении и сжатии инструментального материала, МПа; СКО  $S_p$  и СКО  $S_c$  – среднее квадратические отклонения прочности, МПа. Эти величины определяются один раз экспериментально или берутся из справочников.

Б – Геометрия реза:  $\alpha$  и  $\gamma$  – передний и задний углы заточки реза;  $\varphi$  – главный угол в плане. В – Условия резания:  $S$  и  $t$  – глубина резания (мм) и подача (мм/об);  $\zeta$  – усадка стружки (определяется экспериментально или берется из справочников);  $P_x, P_y, P_z$  – средние значения составляющих сил резания;  $SKO P_x, SKO P_y, SKO P_z$  – их среднеквадратические отклонения.

Программа «VarTool» состоит из трех модулей:

- первый модуль – «Stress» - расчет растягивающих и сжимающих напряжений в опасных точках на передней и задней гранях реза;
- второй модуль – «Var1-Var2» - расчет вероятности разрушения со стороны передней и задней граней реза;
- третий модуль - «Var3» - рассчитывает общую вероятность реза  $P$ . Она рассчитывается исходя из предположения, что разрушение начинается либо со стороны передней, либо со стороны задней грани реза. Учитывая, что эти события являются независимыми случайными величинами, общая вероятность  $P$  будет равна [6]:

$$P = P_1 + P_2 - P_1 P_2, \text{ где } P_1 \text{ и } P_2 \text{ – вероятности разрушения со стороны передней и задней грани соответственно.}$$

Описанный пакет «VarTool» распространяется ИСМ бесплатно по лицензии GNU General Public License.

**Математическая модель пространственного движения платформы и результаты моделирования**

Математическая модель для исследования динамических перемещений инструмента построена на основе приведенных выше зависимостей и сформирована в виде структуры (рис. 8).

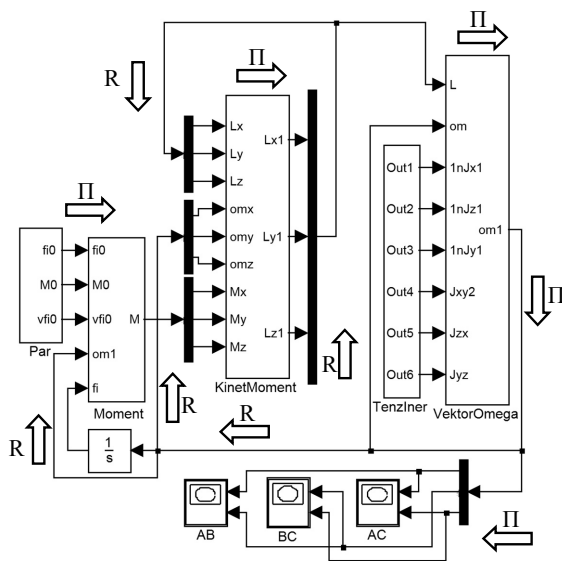


Рис. 8. Общая структурная математическая модель перемещений платформы с приводом главного движения и инструментом

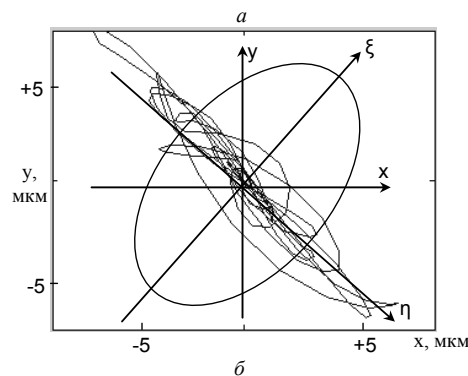
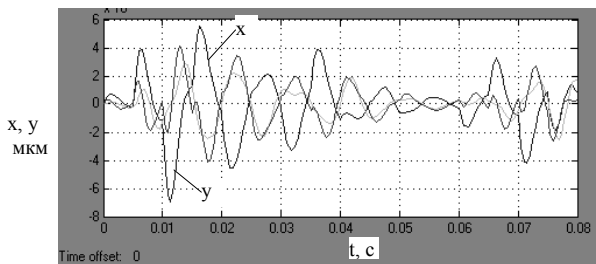


Рис. 9. Перемещения платформы в горизонтальной плоскости, обусловленные случайными нагрузками при резании: а - зависимости проекций перемещений от времени; б – траектория перемещений

Отдельные блоки структурной модели реализуют различные операции. Система дифференциальных уравнений (2) путем интегрирования во времени приведена к системе трех интегральных уравнений. Из них определены проекции кинетического момента

$$L_x = L_{x0} + \int_0^t (M_x - \omega_y L_z + \omega_z L_y) dt, \quad L_y = L_{y0} + \int_0^t (M_y - \omega_z L_x + \omega_x L_z) dt, \\ L_z = L_{z0} + \int_0^t (M_z - \omega_x L_y + \omega_y L_x) dt. \quad (10)$$

где  $L_{x0}, L_{y0}, L_{z0}$  – начальные значения проекции вектора кинематического момента платформы.

Решение интегральных уравнений (10) осуществлено численным методом в блоке KinetMoment. Данный блок реализует прямой ход вычислительной процедуры моделирования (показан стрелкой П). Блок Tenziner реализует вычисления компонент стохастического тензорного поля тензора моментов инерции в соответствии с зависимостями (5), (6). Блок VektorOmega служит для вычисления уточненных значений проекции кинетического момента. Блок Moment служит для аналитического описания моментных нагрузок, которые действуют на платформу от сил резания, а также учитывают моментные нагрузки от приводов. Математическая модель имеет систему обратных связей (показаны стрелкам R), которые замыкают решения полученные для отдельных периодов моделирования.

Математическое моделирование пространственных перемещений инструмента проведено для нагрузок в виде пространственных стохастических сил резания (9). При этом, движение платформы имеет случайный характер. Характерным есть перемещение платформы в горизонтальной плоскости, которое в основном определяет точность

контурной обработки. Случайные перемещения платформы в горизонтальном направлении имеет сложный стохастический характер (рис. 9).

Из результатов математического моделирования следует, что перемещение платформы при действии случайных нагрузок имеет место в пределах узкой полосы, которая соответствует оси минимальной жесткости  $\eta$  упругой системы платформы.

#### **Особенности инструментального обеспечения многокоординатного металлообрабатывающего оборудования**

Из анализа процессов резания многокоординатного оборудования следует практически равноценный по направлению уровень динамических нагрузок на инструмент. Поэтому, для многокоординатного оборудования необходимо выбирать инструмент, обеспечивающий равномерность сил резания по телесному углу поворота инструмента.

В качестве базовых инструментов выбираются бор фрезы различной конструкции.

Целесообразно использовать сферические фрезы и цилиндрические фрезы с полусферическим концом. Использование такого инструмента дает возможность обрабатывать сложные криволинейные поверхности.

Для обработки фасонных поверхностей рекомендуются инструменты с конической и профильной образующими. Для обеспечения эффективного процесса обработки необходимо предусмотреть рациональные формы канавок и соответствующую заточку и затылование кромок фрез из лекальной образующей.

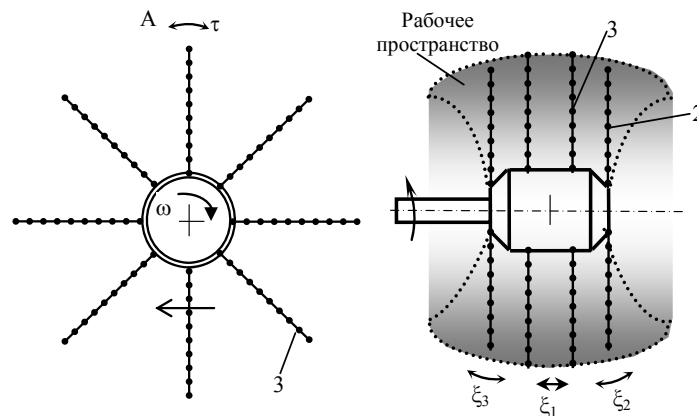


Рис. 10. Инструмент в виде барабана, на котором закреплены гибкие элементы

Для отделочной обработки целесообразно использовать гибкий инструмент, имеющий вид тяжелых нитей, закрепленных на цилиндрическом вращающемся барабане (рис. 10).

Инструмент имеет барабан 1, на котором закреплены гибкие нити 2, 3. Нити имеют вид отдельных, шарнирно соединенных обрабатывающих элементов. Нити закреплены по периферии барабана в плоскостях, перпендикулярных оси вращения. Пространственное перемещение инструмента приводит к нагружению нитей центробежными нагрузками сложного характера. При этом, гибкие нити приобретают сложное колебательное движение в направлениях, показанных стрелками. Образуется торообразная область (показана пунктиром) расположения концов гибких инструментов, которая пересекаясь из обрабатываемой поверхностью, формирует необходимые условия обработки.

#### **Выводы**

1. Для решения научно-технических проблем разработки многокоординатного обрабатывающего оборудования целесообразно осуществить трансфер технологий, разработанных в институте сверхтвердых материалов. В частности, технологий, связанных с использованием композитных материалов, керамики, твердых сплавов. Использование данных технологий дает возможность в 20 ... 30 раз снизить динамические нагрузки в многокоординатном оборудовании, разработать прецизионные углы оборудования, имеющие точность 1...5 мкм, что в 10...20 раз превышает показатель точности оборудования, реализованного в мировой практике станкостроительной промышленности.

2. При проектировании многокоординатного оборудования необходимо учитывать случайные изменения инерционных свойств платформы с установленным на ней шпинделем. Учет изменений инерционных свойств необходимо проводить введением стохастического тензорного поля для описания тензора моментов инерции платформы, который определяет закономерности ее пространственных перемещений.

3. Динамические силы резания возникающие при работе многокоординатного обрабатывающего оборудования могут быть представлены в виде широкополосных случайных процессов, реализации которых представляют собой полигармонические функции, отдельные гармоники которых имеют случайные амплитуды, частоты и фазы. При этом, случайные изменения проекций сил резания не превышают 10...20 % от максимального значения модуля вектора силы резания. Знание случайных изменений проекций сил резания позволяет оценивать надежность работы инструментов из новых материалов в этих условиях

4. В результате математического моделирования установлено, что вынужденные колебания платформы многокоординатного оборудования происходят в определенном направлении, которое соответствует оси минимальной жесткости упругой системы станка.

5. Для выполнения на многокоординатном оборудовании подготовительных и финишно-отделочных операций целесообразно использовать гибкий инструмент, который имеет набор шарнирно соединенных элементов в виде нитей, расположенных по периферии вращающегося барабана, установленного в шпинделе станка.

6. Как направление дальнейших исследований, рекомендуется проведение комплекса опытно-конструкторских работ по созданию упрощенных вариантов многокоординатного обрабатывающего оборудования для решения практических задач обработки изделий из неметаллических материалов (камня, дерева, пластмасс). Целесообразно провести разработки оборудования для переработки вторичного сырья, отходов промышленности и сельского хозяйства. В частности, разработка манипулирующих, погрузочных и пакетирующих устройств, измельчителей, прессов, дробилок и т.п.

#### Список литературы

1. Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В. Обрабатывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры / Под общ. Ред В.Л. Афонина. – М.:Изд-во МГТУ Станкин, Янус. – К., 2006. – 452с.
2. Крижанівський В. А., Кузнецов Ю. М., Валявський І. А., Склярів Р. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. Під ред. Ю. М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
3. Павловський М. А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с. ISBN 966 – 575 – 184 – 0.
4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей, М.:Наука.-1969.- 366с.
5. Девин Л.Н., Вильгельм М. Прогнозирование вероятности разрушения резцов на основе КНБ. Сверхтвердые материалы. - 1992, № 6 - С.41-46.
6. Бетанели А.И. Прочность и надежность режущего инструмента/ А.И. Бетанели.- Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1973.- 304 с.