

O. I. Podkopaev, A. F. Shimansky, P. S. Bychkov, V. V. Vahrin

## THE INFLUENCE OF OPTICALLY ACTIVE OXYGEN CONTENT ON THE DEFECT STRUCTURE OF SINGLE CRYSTAL GERMANIUM

*The authors propose a technique to determine the content of optically active oxygen in single crystal germanium by Fourier infrared spectroscopy and determine concentration of oxygen in germanium samples of different views. The interrelationship of optically active oxygen and dislocation density is revealed as well.*

*Keywords: germanium single crystals, the dislocation density, FT-IR spectroscopy, the oxygen content.*

© Подкопаев О. И., Шиманский А. Ф., Бычков П. С., Вахрин В. В., 2012

УДК 621.6.09: 534.01

Е. В. Раменская, Ю. А. Филиппов, Н. А. Амельченко

## МЕХАНИЗМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИБРАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИНАХ

*Изложены новые результаты исследований в области механики технологических процессов изготовления изделий ракетно-космической техники, раскрывающие механизм образования вибрации на основе принципа формирования и распространения цепной реакции процесса колебания в технологических машинах.*

*Ключевые слова: механизм, вибрация, технологический процесс, моделирование.*

В последние годы заметно оживился темп роста освоения новых изделий ракетно-космической техники, сопровождающийся вводом в эксплуатацию прогрессивных средств технологического оснащения (СТО) и модернизацией существующего парка технологических машин. При анализе мировых показателей конкурентоспособности СТО по пяти направлениям – точность, надежность, производительность, удобство обслуживания, безопасность работы – важное место занимают вопросы оценки вибрационных процессов, понимания и объяснения механизма генерирования вибрации в рабочих машинах.

**Технологическая постановка задачи.** Раскрытие механизма генерирования вибрации в СТО расширяет эффективность их использования, заключающуюся в обеспечении рациональных режимов обработки заготовок по условию минимизации амплитуд компонент вибрации. В технологических системах наибольший интерес представляет степень влияния вибрации на шероховатость и точность обработки.

Основными причинами возбуждения вибрации в СТО являются режимы резания и подачи, особенности конструктивного исполнения режущего инструмента и СТО [1]. При этом значительную роль играют неравномерные вращательные и (или) поступательные движения рабочих валов и суппортов, эксцентриситет между осью вращения шпинделя с режущим инструментом и осью, проходящей через центры элементарных подвижных и вращающихся масс, принадлежащих базовым механизмам.

**Физическая постановка задачи.** В технологических машинах, работающих со стружкообразованием и без него, в процессе работы возникают разнообраз-

ные механические неуправляемые движения в форме поперечных, угловых, случайных колебаний. Установление механизма и концептуальных причин возникновения колебательных процессов в рабочих машинах является тем фактором, который позволяет активно управлять параметрами вибрации. Это особенно важно на стадиях анализа и формирования проектных решений, разработки конструкторской документации конкурентоспособной продукции.

Физико-механические свойства материалов определяются химическим составом и строением их атомов. Орбитальная скорость движения электрона  $10^6$  м/с согласуется со скоростью распространения упругих волн деформации в металле  $6,7 \cdot 10^3$  м/с [2].

При взаимодействии между положительными ионами и отрицательными коллективизированными электронами действуют электрические силы притяжения, стягивающие между собой ионы. Частота колебаний атомов порядка  $10^{13}$  Гц [3].

**Математическая постановка задачи.** Механика технологических процессов формообразования контура деталей базируется на математических началах Ньютона и Лагранжа, базовой теории малых колебаний. Конструкции СТО обладают жесткостью, массой, упругостью динамической системы, характеризующими вибрационные процессы и входящими в дифференциальные уравнения движения. При определенных условиях вибрация может быть опасной для конструкций по признакам разрушения и вредной с точки зрения снижения качества и производительности обработки. Основной задачей в теории управления динамики работы СТО является удержание

и снижение амплитуды компонент вибрации в допустимых пределах.

Аподиктические признаки задачи управления вибрационными явлениями в СТО базируются на логической необходимости раскрытия связи явления вибрации в технологических машинах на основе использования физической сути явления.

О равновесии системы можно судить по характеру движения после выведения ее из равновесного состояния. При колебательном движении система может быть устойчивой и неустойчивой. При одновременном действии восстанавливающих и возмущающих сил механическая система совершает сложное колебательное движение с двумя составляющими: гармоническим свободным колебанием и вынужденным колебанием. При свободных колебаниях амплитуда и начальная фаза колебаний являются произвольными и постоянными, определяемыми по начальным условиям; а при вынужденных колебаниях дифференциальные уравнения движения не содержат произвольных постоянных и не зависят от начальных данных. Частота и период вынужденных колебаний совпадают с частотой и периодом изменения возмущающей силы. При этом если вынужденная частота меньше частоты свободных колебаний, вынужденные колебания и возмущающая сила находятся в одинаковых фазах и с ростом вынужденной частоты растет и амплитуда колебаний. Если вынужденная частота больше частоты свободных колебаний, тогда вынужденные колебания и возмущающая сила находятся всегда в противоположных фазах. В этом случае с увеличением вынужденной частоты амплитуда колебания уменьшается, это важно для СТО, работающих со стружкообразованием. Амплитуда вынужденных колебаний зависит от значения модуля нагрузки и от изменений вынужденной частоты силы.

В общем случае амплитуда вынужденных колебаний может быть оценена рядом известных уравнений, представленных в ГОСТ 24347–80.

В дифференциальное уравнение движения упругой системы входят силы инерции, сопротивления, упругости и возмущения [4]:

$$mq'' + \alpha q' + cq = F \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $m$  – масса;  $\alpha$  – коэффициент сопротивления;  $c$  – жесткость;  $\omega$  – вынужденная частота.

Обобщенная возмущающая сила равна

$$F = \sum_{i=1}^n (F_{ix} dx_i / dq + F_{iy} dy_i / dq + F_{iz} dz_i / dq), \quad (2)$$

где  $F_{ix}$ ,  $F_{iy}$ ,  $F_{iz}$  – проекции силы  $F_i$  на оси  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  декартовых координат. Сопротивление увеличивает период свободных колебаний, затухание колебаний при этом идет интенсивнее.

Приведенное уравнение движения в обобщенных координатах, записанное в форме ускорения, имеет вид

$$q'' + 2hq' + p^2 q = H_j \cdot \sin \omega t, \quad (3)$$

где  $h$  – коэффициент демпфирования;  $p$  – частота собственных колебаний;  $H$  – приведенная нагрузка.

Решение уравнения движения дает закон движения исследуемой упругой системы.

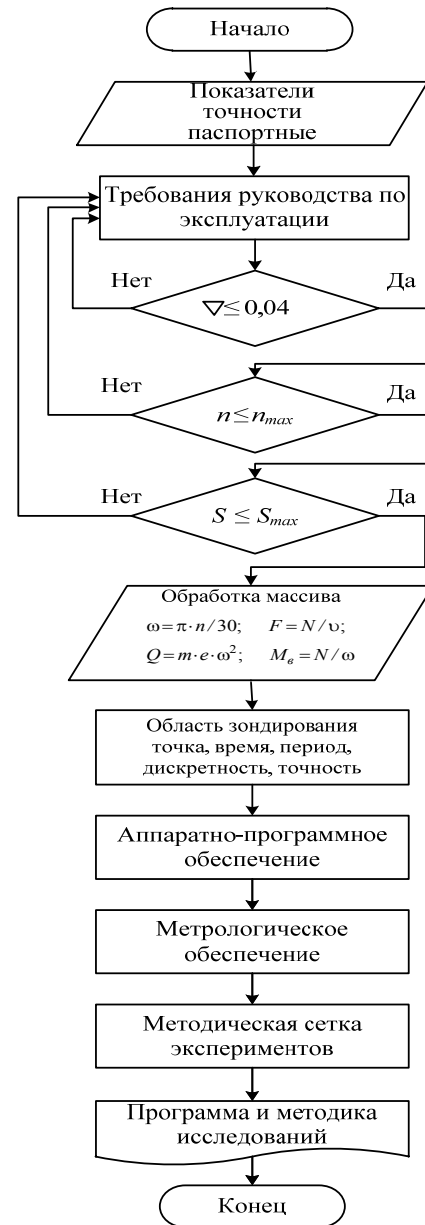


Рис. 1. Феноменологическая модель исследования вибрации рабочей машины

Уравнения угловых колебаний в обобщенных координатах имеют вид

$$I\psi'' + \beta\psi' + C\psi = M \cdot \sin \omega t, \\ \psi'' + 2\xi\psi' + \chi^2\psi = T \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (4)$$

где  $I$  – момент инерции твердого тела;  $\beta$  – коэффициент сопротивления при угловых колебаниях;  $\xi$  – коэффициент демпфирования для угловых колебаний.

Приведенные компоненты вибрации в процессе исследования, как правило, регистрируются стандартной измерительной аппаратурой, например, переносным виброметром типа СМ 3001 или модели АТТ 9002 [5].

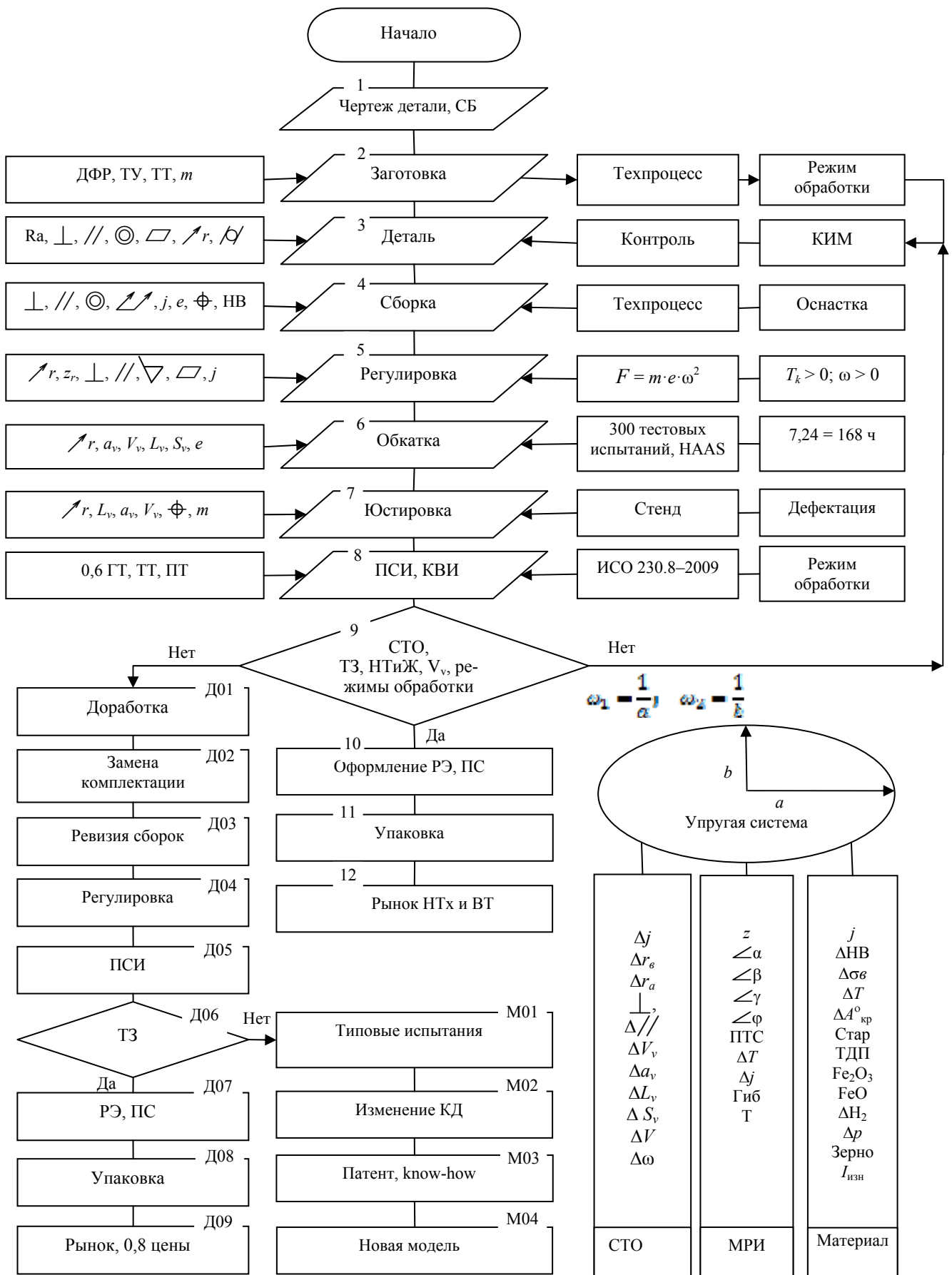


Рис. 2. Технологическая модель генерирования вибрации в технологической машине

На основе фундаментальных уравнений малых колебаний разрабатываются алгоритмы исследования, измерения и регистрации компонент вибрации с их параметрами: амплитудой, частотой и периодом. Базовым документом при выполнении физического измерения может послужить технический регламент ISO/TR 230-8-2009 «Свод правил по испытанию станков. Часть 8. Оценка уровней вибрации».

**Разработка феноменологической модели.** Изложение и решение задачи раскрытия механизма генерирования вибрации начинается с представления и анализа феноменологической модели [6] (рис. 1).

При этом выполняется теоретическая проработка рабочей документации СТО с оценкой величин геометрической, технологической, параметрической точности и параметров, входящих в техническую характеристику; определяются конкурирующие технологические показатели режима и динамики базового процесса; выполняется первичная привязка измерительных устройств к объекту исследования.

Руководствуясь феноменологической моделью, строится технологическая модель исследования механизма генерирования вибрации (рис. 2), например, в процессе изготовления товарной продукции в виде детали.

На рис. 2 приняты следующие условные обозначения: ДФР – допуск формы и расположения поверхностей; ТУ – технические условия; ТТ – технические требования;  $m$  – масса; Ra – шероховатость;  $\perp$  – допуск перпендикулярности;  $\parallel$  – допуск перпендикулярности;  $\odot$  – допуск соосности;  $\square$  – допуск плоскостности;  $\nearrow r$  – радиальное биение;  $\curvearrowright$  – допуск цилиндричности;  $\nearrow$  – полное биение;  $j$  – жесткость системы;  $e$  – эксцентриситет;  $\Phi$  – точность позиционирования; НВ – твердость.  $z_r$  – радиальный зазор;  $\nabla$  – установка по уровню, мм/м;  $a_v$  – виброускорение;  $V_v$  – виброскорость;  $L_v$  – логарифмический уровень акустических характеристик;  $S_v$  – виброперемещение; 0,6 ГТ – сдаточные нормы геометрической точности; ТТ – нормы технологической точности; ПТ – нормы параметрической точности; СБ – сборочный чертеж; ПСИ – приемосдаточные испытания; КВИ – контрольно-выборочные испытания; СТО – средства технологического оснащения; ТЗ – технического задания; НТиЖ – нормы точности и жесткости; РЭ – руководство по эксплуатации; ПС – паспорт; НТх и ВТ – новая техника и высокие технологии; КД – конструкторская документация;  $T_k$  – кинетическая энергия;  $\omega$  – вынужденная частота; 7,24 = 168 ч – типовые испытания; КИМ – коэффициент использования материала; 0,8 цены – реализация по себестоимости; ИСО 230.8-2009 – международные стандарты по испытаниям станков; Д01–Д09 – доработка; М01–М04 – метрологическое обеспечение. Для СТО (средств технологического оснащения):  $\Delta j$  – отклонение от жесткости;  $\Delta r_a$  и  $\Delta r_e$  – погрешности передней и задней опоры;  $\perp$  – допуск перпендикулярности;  $\Delta \parallel$  – отклонение от параллельности;  $\Delta V_v$  – отклонение от виброскорости;  $\Delta a_v$  – отклонение от виброускорения;  $\Delta L_v$  – отклонение от логарифмического

уровня;  $\Delta S_v$  – отклонение от виброперемещения;  $\Delta V$  – отклонение от скорости;  $\Delta \omega$  – отклонение вынужденной частоты. Для МПИ (металлорежущего инструмента):  $z$  – число зубьев;  $\angle \alpha$ ,  $\angle \beta$ ,  $\angle \gamma$ ,  $\angle \varphi$  – углы режущей кромки инструмента; ПТС – пластины твердосплавные;  $\Delta T$  – стойкость инструмента;  $\Delta j$  – отклонение от жесткости; Гиб – гибкость; Т – температура. Для материала:  $j$  – жесткость;  $\Delta НВ$  – разброс твердости;  $\Delta \sigma_v$  – отклонение от предела текучести;  $\Delta T$  – температуростойкость;  $\Delta A^{\circ}_{кр}$  – эффект старения; Стар – старение; ТДП – термодинамические процессы; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – формирование пленок; Н<sub>2</sub> – водоразжижение;  $\Delta \rho$  – погрешность плотности; Зерно – зернистость;  $I_{изн}$  – параметр износа.

По результатам проработки формируется структура, программа и методика испытаний СТО, класс точности измерительных приборов для получения результатов испытаний не ниже 3-й степени точности при 2-м классе точности приборов, регламентированных техническими регламентами серии ИСО 230.

Анализ рабочих и сборочных чертежей изделия, технических условий и входящих технических требований заканчивается разработкой маршрутного и операционного технологических процессов.

Сложный процесс формирования механизма генерирования вибрации в технологических системах представлен в виде развития цепной реакции (рис. 3), впервые рассмотренной академиком Н. Н. Семеновым для процесса горения.

На рис. 3 приняты следующие условные обозначения:  $\nabla$  – точки и область зондирования компонент вибрации при экспериментальных исследованиях;  $e_s(\omega)$  – градиент скорости изменения магнитного зазора, шага зубцов, напряжения питания электродвигателя привода первого механизма, подлежащего пуску для начала работы;  $e_{ск}$  – параметры собственных колебаний системы, а также характеристики внешних факторов окружающей среды по сейсмичности;  $e_{Mz}(\omega)$  – градиент изменения угловой скорости якоря электродвигателя от влияния зазора в опорах, соосности, радиального биения;  $e_M(p)$  – вариация собственной частоты колебания двигателя от изменения электромагнитных и электромеханических постоянных времени двигателя;  $e_c(\omega)$  – характеристика жесткости системы;  $e_f(\omega)$  – влияние линейно-угловых размеров конструкции механизмов;  $e_s(\omega)$  – статический и динамический прогиб рабочих валов;  $e_{перед}(\omega) - e_{вал}(\omega)$  – градиенты амплитуд вибрации вращающегося вала;  $e_{подш}(\omega)$  – амплитуда вибрации в подшипниках базовых механизмов;  $e_{\omega}(\omega)$  – изменение частоты вращения рабочего вала от вариации динамических нагрузок;  $e_{рег}(\omega)$  – удельный регламентированный дисбаланс подвижных масс;  $e_{посад}(\omega)$  – характер изменения посадки опоры;  $\emptyset T_{pc}$  – влияние соосности вращающихся валов;  $e(p)$  – вариация частоты собственных колебаний технологической системы;  $e_{ри}(\omega)$  – градиент амплитуды от способа и точности подготовки режущего инструмента;  $e_z(\omega)$  – влияние шага зубьев режущего инструмента на формирование ударных явлений;



Исследование механизма генерирования вибрации и цепной реакции ее распространения целесообразно выполнять при стендовых испытаниях рабочей машины.

Стендовая обкатка первого рода перед контрольными испытаниями проводится после изготовления изделия для проверки его работоспособности, а также приработки контактных поверхностей. Операция выполняется по специальному регламенту и тестовым программам, позволяющим уточнить механизм генерирования вибрации, цепную реакцию ее распространения. Обкатка второго рода производится в начальный период эксплуатации технологической машины после монтажа в цехе в условиях производства. Приемосдаточные испытания (контрольно-выборочные испытания) выполняются по программе и методике испытаний, где проверяется геометрическая и технологическая точности и анализируется параметрическая точность с установлением фактических величин соответствия ужесточенному уровню значений параметров проверки. В ходе проверки окончательно устанавливается класс точности рабочих машин.

Скорость распространения продольных колебаний в конструкции рабочей машины можно оценить по функции [1]:

$$v_{np} = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}; \quad \lambda = E\delta / [(1 - 2\delta)(1 + \delta)];$$

$$\mu = E / 2(1 + \delta), \quad (6)$$

где  $\lambda$ ,  $\mu$  – параметры Ламе;  $\rho$  – плотность материала;  $\delta$  – коэффициент Пуассона.

Скорость распространения поперечных колебаний, соответственно, аппроксимируется функцией вида [1]:

$$v_n = \sqrt{\mu / \rho}. \quad (7)$$

Раскрытие механизма возникновения вибрации на основе математических методов, фундаментальных начал механики Лагранжа и генерирования вибрации в рабочей машине по принципу цепной реакции позволяет создавать управляющие алгоритмы стабилизации режимных параметров технологических процессов.

Частная математическая модель механизма генерирования вибрации в рабочей машине записана в виде функции пиковой виброскорости [7]:

$$V_{sp} = \frac{n \cdot d_i \cdot z}{60 \cdot (d_e - d_i)} \cdot \left[ \pi \cdot \left\{ \sum_{rt=1}^N \int_0^{IT} dx / (k_r \cdot x + k_t) \right\} / N + \right. \\ \left. + \left[ \sum_{rb=1}^M \int_0^{it} dy / (k_l \cdot y + k_r) \right] / M \right] / 2 + \frac{1}{n_k - 1} \cdot \left( \sum_{i=1}^{n_k} x_i \right), \quad (8)$$

где  $V_{sp}$  – виброскорость в локальной энергонасыщенной интегральной точке механизма главного движения;  $d_i$ ,  $z$  – параметры опор качения;  $n$  – частота вращения;  $it$ ,  $IT$  – допуски на размеры контактных пар;  $x_i$  – составляющие компоненты виброскорости, которые определяются по частным функциям, описывающим допуски в подвижных контактных парах, кинематические связи, эксцентриситет и соосность, динамические прогибы в рабочих валах.

При анализе механизма генерирования вибрации особое внимание следует обращать на технологии разработки и производства машин. Исходными документами для решения поставленной проблемной задачи – раскрытия механизма возникновения вибрации – являются: технические условия на изделия, отечественные и зарубежные технические регламенты, патенты и ноу-хау, рабочие чертежи деталей и сборок, типовые технологические процессы.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Механизм генерирования и распространения вибрации в технологических машинах, построенный на принципах теории цепной реакции, наиболее точно отвечает физическому процессу действия вибрации на точность формирования контура деталей. Генерация вибрации в рабочей машине начинается с момента пуска двигателя привода первого механизма и распространяется по принципу цепной реакции со скоростью не выше  $6,7 \cdot 10^3$  м/с.

2. Раскрытие механизма возникновения вибрации на основе математических методов описания технологического процесса, построенных на фундаментальных началах Ньютона и Лагранжа, генерирования и распространения вибрации в рабочей машине по принципу цепной реакции позволяет создать новые управляющие алгоритмы стабилизации режимных параметров вибрации технологических процессов.

3. Созданная на основе феноменологической модели исследования вибрации рабочей машины, технологическая модель генерирования вибрации в технологической машине раскрывает значимость параметров геометрической, технологической и параметрической составляющих показателей точности и их влияние на динамику процесса резания материалов.

4. Микроколебания в материалах механизмов на уровне атомно-молекулярного строения не оказывают существенного влияния на вибрацию станка. Однако изменение постоянной времени демпфирования и динамической вязкости материала в процессе работы станка подтверждает степень влияния металлических и химических связей между атомами, ионами и коллективизированными электронами, свидетельствующего о непостоянстве сил сопротивления, входящих в дифференциальное уравнение колебаний материальной точки.

5. Величина эксцентриситета оси вращения с осью, проходящей через центры вращающихся масс, большей частью формируется конструктивными решениями и, как следствие, технологическим процессом изготовления деталей, включая операцию динамической балансировки роторов.

#### Библиографические ссылки

1. Никифоров А. Н. Проблемы колебаний и динамической устойчивости быстровращающихся роторов // Вестник научно-технического развития. 2010. № 3. С. 31–53.
2. Седов Л. И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1984. Т. 2.

3. Кузьмин Б. А., Абраменко Ю. Е., Кудрявцев В. А. Технология металлов и конструкционные материалы. М. : Машиностроение, 1989.

4. Айзерман М. А. Классическая механика. М. : Наука, 1980.

5. Способ диагностики и оценки виброактивности станков, работающих с лезвийным инструментом : пат. 2332652 С1 Рос. Федерация : МПК G01M 7/00 /

Филиппов Ю. А., Ручкин Л. В., Раменская Е. В. Оpubл. 27.08.2008, Бюл. № 24.

6. Углов А. Л., Ерофеев В. И., Смирнов А. Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М. : Наука, 2009.

7. Раменская Е. В. Анализ виброактивности металлорежущих станков // Вестник СибГАУ. Вып. 6. (13). 2006. С. 86–89.

E. V. Ramenskaya, Yu. A. Philippov, N. A. Amelchenko

## MECHANISM OF GENERATING AND DISTRIBUTION OF VIBRATION IN TECHNOLOGICAL MACHINES

*New results of the researches in the sphere of mechanics of technological processes of rocket and space products technology are presented, the mechanism of vibration appearance, on the basis of formation and distribution of chain reaction of oscillation process in technological machines, is considered.*

*Keywords: mechanism, vibration, technological process, modeling.*

© Раменская Е. В., Филиппов Ю. А., Амелченко Н. А., 2012

УДК 583.975 + 621.318.1

В. А. Семячков, А. Н. Рыбакова, В. С. Жигалов, В. Г. Мягков

## ТВЕРДОФАЗНЫЕ РЕАКЦИИ В ПЛЕНОЧНЫХ ДВУСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Исследованы фазовые превращения и магнитные свойства пленочных слоистых структур Fe/Pd и CoCr при термообработке. Показано, что в двухслойных пленках Fe/Pd, выращенных на подложках из MgO, в зависимости от толщинных соотношений железа и палладия и от температуры отжига в системе формируются две упорядоченные фазы –  $L1_0$ -FePd(001) и  $L1_2$ -FePd<sub>3</sub>(001). Исследования магнитных свойств фаз показали, что  $L1_0$ -фаза является высокоанизотропной, обладает перпендикулярной анизотропией и большой величиной коэрцитивной силы, а  $L1_2$ -фаза – магнитомягкая и имеет высокие значения намагниченности насыщения.*

*Показано, что в пленках системы CoCr появляется перпендикулярная анизотропия, которая вызвана уменьшением значения анизотропии формы и фактом текстурированности и расположения пленки гексагональной с-осью нормально плоскости пленки. Твердофазный синтез в системе CoCr приводит к образованию фазы твердого раствора хрома на базе гексагонального кобальта  $\epsilon$ -Co(Cr). Полученные результаты имеют как научное, так и прикладное значение.*

*Ключевые слова: твердофазный синтез, реакция, пленки, переходные металлы.*

Тонкие пленки являются материалами, с помощью которых можно найти решение многих задач современной наноэлектроники. Структурные и магнитные свойства тонких пленок FePd, упорядоченных по типу  $L1_0$ , исследуются в связи с их потенциальной пригодностью для высокоплотной магнитной записи информации и создания специальных магнито жестких сред [1; 2]. Упорядоченные FePd<sub>3</sub>-пленки в настоящее время изучены недостаточно и поэтому их исследование представляет научный и практический интерес. Система Co/Cr – это перспективный материал для использования в качестве сред с возможностью перпендикулярной записи информации и также еще не до конца изучена [3–5].

Получение этих пленочных систем методом твердофазного синтеза (ТФС) еще не производилось. В связи с этим в данной работе обращалось внимание на возможные механизмы и процессы, способствующие синтезу фаз в исследуемых системах, а также изучались магнитные и анизотропные свойства этих пленок [6; 7].

Идентификация фаз проводилась с использованием рентгеноструктурного анализа. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование твердофазных межслойных химических взаимодействий для синтеза пленочных образцов с меньшими энергетическими и экономическими затратами [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2011)», проект № 2.1.1/9193.