

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ  
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.01 — Теоретическая механика, 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела, 01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, 05.02.02 — Машиноведение системы приводов и детали машин, 05.02.04 — Трение и износ в машинах, 05.02.05 — Роботы, мехатроника и робототехнические системы, 05.02.07 — Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии, 05.02.11 — Методы контроля и диагностика в машиностроении, 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы, 05.02.18 — Теория механизмов и машин, 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности

2021 Том 22  
2 (247)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Современные технологии сборки

Кучин А.А., Симаков А.Л., Кузнецова С.В. Система позиционно-силового управления сборочным роботом-манипулятором с силовым очувствлением по давлению в исполнительных цилиндрах . . . . . 51

#### Трение и смазка в машинах и механизмах

Кулешова Е.М., Поляков С.А. Оценка ресурса опоры быстроходного вала червячной передачи при использовании подшипника скольжения . . . . . 55  
Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Композиционные покрытия для режущего инструмента после ионного смешивания . . . . . 62  
Эрлих Б.М. Влияние ударного возмущения на состояние автоколебаний в машинах и механизмах в системе с различными типами нелинейностей сложной структуры . . . . . 69  
Ноженков М.В. Свойства вихревых структур при росте вакуумных ионно-плазменных покрытий . . . . . 76

#### В помощь конструктору, технологу

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросов А.Е. Автоматизированная установка упругих резиновых уплотнений во внутренние канавки цилиндрических деталей . . . . . 87  
Попов И.П. Реактансы и сассептансы механических систем . . . . . 91

Председатель редакционного совета  
В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

#### Редакционный совет

##### МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф. Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.  
А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц.  
В.В. БАРДУШКИН, д.ф.-м.н. А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.  
И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф. И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.  
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф. Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.  
С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н. А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.  
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.

#### Региональные редсоветы

##### ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, акад. РАН  
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

##### ВОЛГОГРАД

М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.  
В.И. ЛЫСАК, акад. РАН

##### ИЖЕВСК

И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.  
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.  
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

##### КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

##### КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

##### КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.  
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

##### НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

##### ОРЕЛ

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.  
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

##### ОРЕНБУРГ

А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.  
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.  
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

##### ПЕРМЬ

С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.  
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

##### РОСТОВ-НА-ДОНУ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.  
И.В. КОЛЕСНИКОВ, д.т.н., проф.  
А.П. СЫЧЕВ

##### РЫБИНСК

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.  
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.  
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

##### САМАРА

Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.  
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.т.н., проф.

##### САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

##### ТОМСК

А.В. КОЛУБАЕВ, д.ф.-м.н.  
В.Е. ПАНИН, акад. РАН

##### ТУЛА

А.А. МАЛИКОВ, д.т.н., проф.  
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

##### ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

##### Беларусь

##### МИНСК

В.Л. БАСИНОК, д.т.н.  
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

##### ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

##### Украина

##### КИЕВ

А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.  
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

##### ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

##### Польша

П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.  
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в РОСКОМНАДЗОРЕ.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953  
от 09.12.2015 г.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — 84967) или непосредственно в издательстве  
Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96  
E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru  
Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

THE MONTHLY  
JOURNAL  
FOR SCIENTISTS  
AND MANUFACTURERS

# ASSEMBLING



## IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.01 — Theoretical mechanics, 01.02.04 — Mechanics of a deformable solid, 01.02.06 — Dynamics, durability of machines, devices and apparatus, 05.02.02 — Machine science of drive systems and machine parts, 05.02.04 — Friction and wear in machines, 05.02.05 — Robots, mechatronics and robotic systems, 05.02.07 — Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing, 05.02.10 — Welding, related processes and technologies, 05.02.11 — Control methods and diagnostics in mechanical engineering, 05.02.13 — Machines, units and processes, 05.02.18 — Theory of mechanisms and machines, 05.04.11 — Nuclear reactor construction of machine, units and technology of the nuclear industry materials

2021 Vol. 22  
2 (247)

### CONTENTS

#### *Modern technologies in assembly*

**Kuchin A.A., Simakov A.L., Kuznetsova S.V.** Positional power control system of assembly robot manipulator with power sensing by pressure in the executive cylinders . . . . . 51

#### *Friction & lubrication in machines and mechanisms*

**Kuleshova E.M., Polyakov S.A.** Analysis of the relationship between improving the performance of worm gear sliding bearings and the use of film-forming lubricants . . . . . 55

**Migranov M.Sh., Migranov A.M.** Composite coatings for cutting tools after ion mixing . . . . . 62

**Erlich B.M.** Influence of shock disturbance on the state of self-oscillations in machines and in mechanisms in a system with various types of nonlinearities of complex structure . . . . . 69

**Nozhenkov M.V.** Properties of vortex structures during the growth of vacuum ion-plasma coating . . . . . 76

#### *Industrial and design engineer's aid*

**Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Matrosov A.E.** Automated installation of elastic rubber seals into inner grooves of cylindrical parts . . . . . 87

**Popov I.P.** Reactances and susceptances of mechanical systems . . . . . 91

**Chair of Editorial Advisory Board —  
Member of Russian Academy of Science**  
V.I. KOLESNIKOV

#### Editors

##### MOSCOW

A.S. VASIL'EV  
(Chief editor)  
V.V. BARDUSHKIN  
I.A. BUYANOVSKY  
M.V. VARTANOV  
S.M. ZAKHAROV  
I.N. ZININA

Yu.L. IVANOV  
A.V. IGNATOV  
A.I. KUMENKO  
I.A. LUBININ  
B.V. SHANDROV  
A.G. KHOLODKOVA

#### Regional editors

##### VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN  
A.A. SUPONIA

##### VOLGOGRAD

M.G. KRISTAL  
V.I. LYSAK

##### IZHEVSK

I.V. ABRAMOV  
V.G. OSETROV  
B.A. YAKIMOVICH

##### KAZAN

R.I. ADGAMOV

##### KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

##### KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN  
A.M. SHPILEV  
NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

##### OREL

Yu.S. STEPANOV  
G.A. KHARLAMOV

##### ORENBURG

A.N. POLYAKOV  
A.I. SERDUK  
A.P. FOT

##### PERM

S.M. BELOBORODOV  
V.F. MAKAROV

##### ROSTOV-ON-DON

A.A. RYZHKIN  
I.V. KOLESNIKOV  
A.P. SYCHEV

##### RYBINSK

V.F. BEZIAZYCHNYI  
V.V. NEPOMILUEV  
A.N. SEMENOV

##### SAMARA

Yu.A. VASHUKOV  
M.A. EVDOKIMOV

##### ST.-PETERSBURG

E.V. SHALOBAEV

##### TOMSK

A.V. KOLUBAEV  
V.E. PANIN

##### TULA

A.A. MALIKOV  
V.V. PREYS

##### KHABAROVSK

V.I. SCHPORT

##### Belarus

##### MINSK

V.L. BASINJUK  
M.L. KHEIFETZ

##### GOMEL

V.E. STARZHINSKI

##### Ukraine

##### KIEV

A.S. ZENKIN  
V.A. MATVIENKO

##### DONETSK

A.N. MIKHAILOV

##### Poland

P. LEBKOVSKI  
E. LUNARSKII

#### Executive editors of current issue:

E.M. NUZHINA, I.M. GLIKMAN

Journal is distributed on subscription, which can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — 84967) or directly in editorial of the journal.

Ph.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

E-mail: sborka@mashin.ru, <http://www.mashin.ru>

The reference to the *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal* during reprint of the materials is mandatory.

Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

The journal is registered by ROSKOMNADZOR.  
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

А.А. Кучин, А.Л. Симаков, д-р техн. наук, С.В. Кузнецова, канд. техн. наук  
(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева)

## Система позиционно-силового управления сборочным роботом-манипулятором с силовым очувствлением по давлению в исполнительных цилиндрах

*Рассмотрен актуальный вопрос силового очувствления сборочного робота-манипулятора на основе вычисления сил взаимодействия с объектами внешней среды по изменению давления в исполнительных пневмоцилиндрах. Определена структурная схема системы позиционно-силового управления сборочным роботом-манипулятором для предложенного способа силового очувствления. Составлен алгоритм функционирования системы позиционно-силового управления сборочным роботом-манипулятором для выполнения типового соединения деталей "вал—втулка".*

*The paper deals with the topical issue of the power sensing of the assembly robot of the manipulator based on the calculation of the forces of interaction with the objects of the external environment by the change in pressure in the actuating pneumatic cylinders. The structural diagram of the positional power control system of the assembly robot manipulator for the proposed method of power sensing has been determined. An algorithm for the functioning of the position/force control system of an assembly robot manipulator for performing a typical connection of parts "shaft—sleeve" also has been made.*

**Ключевые слова:** позиционно-силовое управление, сборочный робот-манипулятор, давление, сборочная операция.

**Keywords:** position and force control, assembly robot-manipulator, pressure, assembly operation.

Адаптивные роботы с параллельной кинематической структурой применяют в автоматизации промышленности. Для управления ими необходимо располагать минимум двумя видами информации: о положении рабочего органа робота и о силе взаимодействия рабочего органа с объектами внешней среды. Такие системы управления роботами получили название "позиционно-силовые системы управления" [1]. Параллельная кинематическая структура робота-манипулятора в совокупности с позиционно-силовым управлением обеспечивает не только быстрое и точное перемещение рабочего органа по сложным пространственным траекториям вдоль различных поверхностей, но и требуемое силовое воздействие на внешние объекты. Адаптивные роботы-манипуляторы с указанными свойствами успешно используют в производстве на этапе сборки изделий для быстрого автоматического выполнения сборочных операций.

На сегодняшний день для силового очувствления робота чаще всего применяют специ-

альные силомоментные датчики [2]. Однако использование таких датчиков в случаях выполнения сборочных операций, не требующих высокой точности, нецелесообразно в силу их высокой стоимости и сложности внедрения в конструкцию робота. В качестве альтернативного способа определения сил взаимодействия робота с внешними объектами служат датчики косвенных показателей, например, датчики давления в пневмоцилиндрах, однако при позиционно-силовом управлении требуются изменения имеющихся методов управления и разработка новых методов адаптивного управления роботами-манипуляторами.

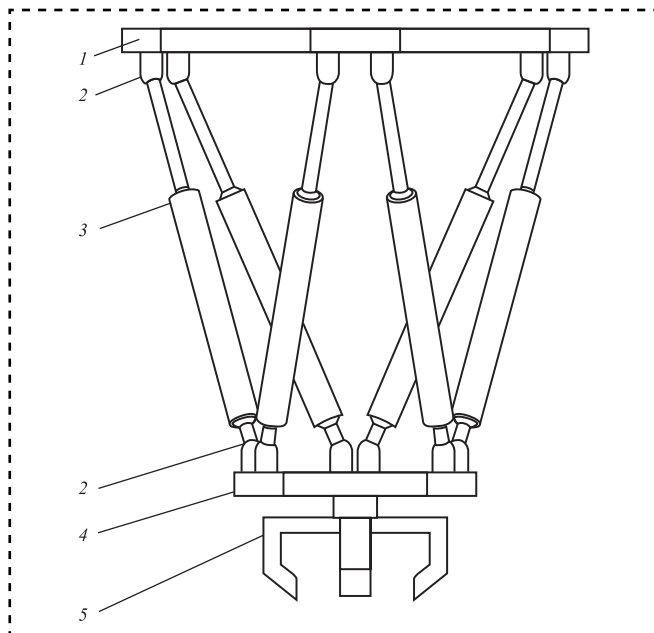
В современной теории автоматического управления существует несколько методов позиционно-силового управления манипуляционными роботами. Значительный вклад в создание и развитие этих методов управления внесли отечественные и зарубежные ученые Д.М. Гориневский, Г.В. Письменный, N. Hogan [3–5]. Однако вопрос разработки новых схем и методов адаптивного управления роботами-

манипуляторами остается открытым, что делает его актуальным в данный момент.

**Цель работы** — разработка структуры системы позиционно-силового управления пневматическим роботом-манипулятором на основе вычисления сил взаимодействия с объектами внешней среды по изменению давления в исполнительных пневмоцилиндрах.

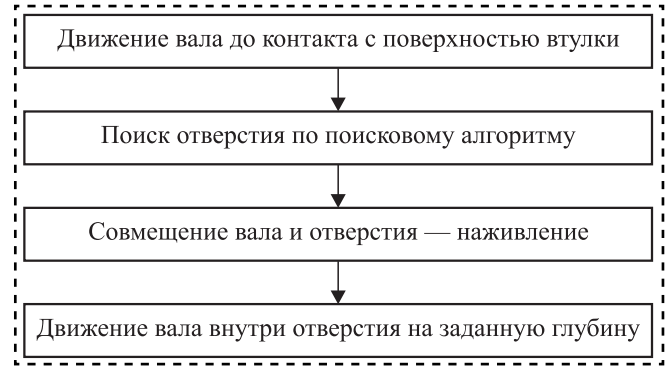
Рассматриваемый пневматический робот-манипулятор предназначен для проведения сборочных операций. Кинематическая структура данного робота — гексапод. Подвижное основание гексапода может быстро и жестко позиционироваться в пространстве по шести степеням свободы с заданной точностью или двигаться в ограниченном диапазоне с заданной скоростью или ускорением [6]. Сборочный робот-манипулятор состоит из двух оснований, одно из которых является неподвижным, а другое подвижным, на подвижном основании жестко установлено устройство захвата деталей. Подвижное и неподвижное основания соединены между собой шестью исполнительными пневмоцилиндрами через сферические шарниры. Приведение в движение подвижного основания осуществляется за счет изменения выдвижения штоков пневмоцилиндров (рис. 1).

Синтез метода позиционно-силового управления пневматическим роботом-манипулятором с параллельной кинематической структурой на



**Рис. 1. Сборочный робот-манипулятор с параллельной кинематической структурой:**

1 — неподвижное основание гексапода; 2 — шарнирное соединение; 3 — исполнительный пневмоцилиндр; 4 — подвижное основание гексапода; 5 — устройство захвата деталей



**Рис. 2. Этапы установки вала в отверстие**

основе вычисления сил взаимодействия с объектами внешней среды по изменению давления в исполнительных пневмоцилиндрах проводили для выполнения типичных сборочных операций: соединения деталей цилиндрической формы — установка вала в отверстие базовой детали.

С точки зрения управления сборочным роботом-манипулятором процесс установки вала в отверстие базовой детали можно разделить на четыре последовательных этапа (рис. 2) [3].

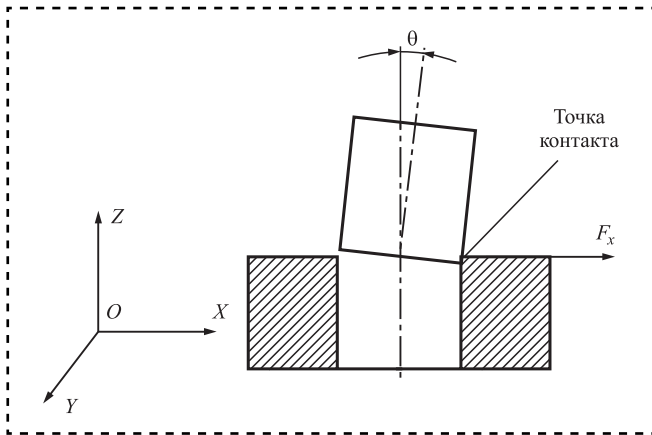
Управление роботом-манипулятором на первом этапе при движении вала до контакта с поверхностью втулки осуществляется по позиционному каналу управления согласно программному изменению координат подвижного основания с устройством захвата  $X_n(t)$ ,  $Y_n(t)$ ,  $Z_n(t)$ . На данном этапе управление осуществляется на основе сравнения программного положения подвижной платформы и ее реальным положением, при этом силы взаимодействия устройства захвата с внешними объектами в управлении не используют.

На втором этапе установки вала в отверстие сборочный робот-манипулятор управляется по двум каналам управления: позиционному и силовому. Управление по силовому каналу станет активным после того, как торец вала коснется поверхности, на которой находится отверстие. При отработке поисковой траектории устройством захвата с установленным в него валом, последний должен перемещаться по поверхности детали с заранее установленной силой контакта  $F_k$ . Поиск отверстия считается завершенным при достижении контакта боковой поверхности вала с кромкой отверстия (рис. 3), вместе с этим необходимо выполнение следующего условия:

$$F_x \geq F_0 \text{ или } F_y \geq F_0, \quad (1)$$

где  $F_0$  — пороговое значение силы, заданное заранее программно;

$F_x$  — сила взаимодействия вала и отверстия при попытке движения вдоль оси  $Ox$ ;



**Рис. 3. Контакт боковой поверхности вала с кромкой отверстия:**

$\theta$  — угол рассогласования оси отверстия и оси вала;  
 $F_x$  — сила взаимодействия вала и отверстия при попытке движения вдоль оси  $OX$

$F_y$  — сила взаимодействия вала и отверстия при попытке движения вдоль оси  $OY$ .

После обнаружения отверстия переходят к третьему этапу сборки, на котором происходит наживление. На этом этапе от сборочного робота-манипулятора требуется минимизация углов рассогласования оси вала и оси отверстия по осям  $OX$  и  $OY$  [3]. При этом перемещается подвижное основание манипулятора как в горизонтальной плоскости параллельной поверхности детали, так и вдоль оси отверстия, тогда сигналы управления можно представить в виде:

$$\begin{aligned} v_x(t) &= k_x F_x; \\ v_y(t) &= k_y F_y; \\ v_z(t) &= k_z (F_z - F_3), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$ ,  $v_z(t)$  — скорости перемещения детали по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ ;

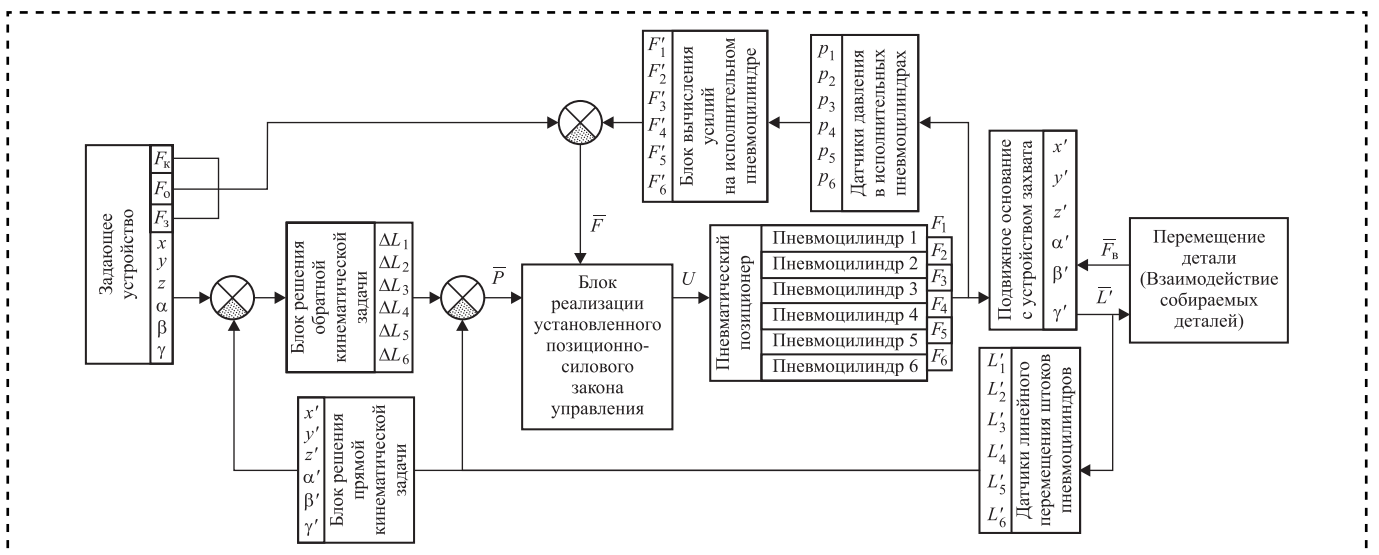
$F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  — силы взаимодействия вала и отверстия по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ ;

$F_3$  — критическая сила, превышение которой приведет к заклиниванию детали;

$k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  — коэффициенты обратной связи по силе.

Финальный этап сборки начинается после того, как вал погрузится в отверстие на заданную глубину  $L_{\min}$ , которая минимизирует возможность перекоса и заклинивания при дальнейшем движении вала внутри отверстия. Управление устройством захвата робота-манипулятора на последнем этапе осуществляется аналогично управлению на этапе наживления с тем условием, что на вертикальную составляющую сил взаимодействия вала и отверстия устанавливается ограничение, определяющее необходимую силу установки вала в отверстие при отсутствии перекоса и заклинивания [3]. Сборку считают завершённой при погружении вала в отверстие на заданную глубину  $L_{\max}$ .

На основании автоматического сборочного процесса, в котором осуществляется операция установки вала в отверстие базовой детали, составим структурную схему системы позиционно-силового управления пневматическим роботом-манипулятором на основе вычисления сил взаимодействия



**Рис. 4. Структурная схема системы позиционно-силового управления сборочным роботом-манипулятором:**

$x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — требуемое положение подвижного основания;  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma'$  — реальное положение подвижного основания;  $\Delta L_1 \dots \Delta L_6$  — изменения выдвижения штоков пневмоцилиндров;  $F_1 \dots F_6$  — развиваемая сила пневмоцилиндров;  $p_1 \dots p_6$  — давление в пневмоцилиндрах;  $F'_1 \dots F'_6$  — сила, рассчитанная по давлению пневмоцилиндров;  $U$  — управляющий сигнал, определяемый законом управления и входными данными  $\bar{P}$  и  $\bar{F}$ ;  $\bar{F}_в$  — сила воздействия от внешних объектов;  $\bar{P}$  — информация для позиционного канала управления;  $\bar{F}$  — информация для силового канала управления

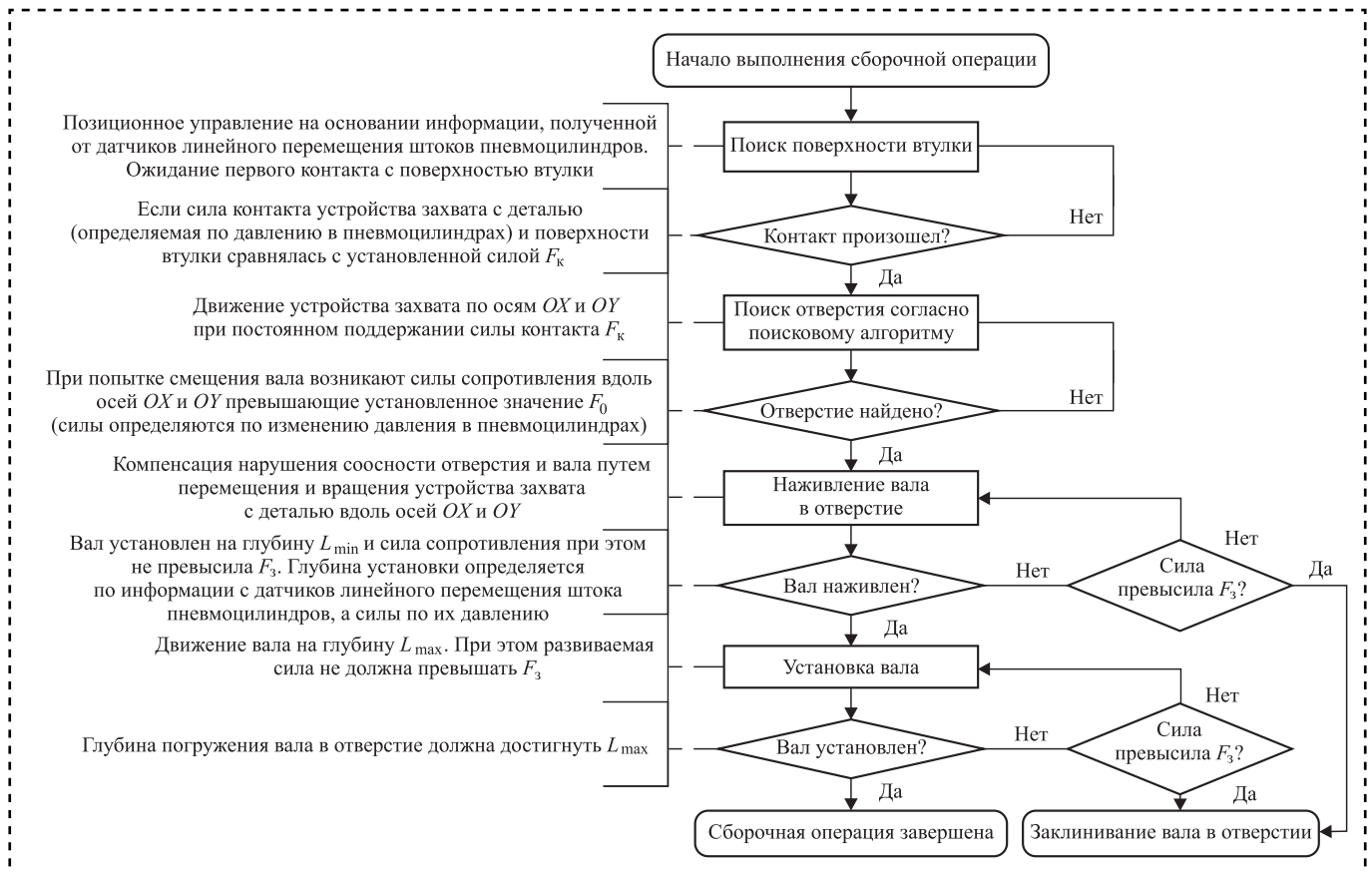


Рис. 5. Блок-схема работы системы позиционно-силового управления сборочным роботом-манипулятором

с объектами внешней среды по изменению давления в исполнительных пневмоцилиндрах (рис. 4).

Алгоритм работы системы позиционно-силового управления сборочным роботом-манипулятором для выполнения типового соединения деталей "вал—втулка" представим в виде блок-схемы (рис. 5).

Структура системы позиционно-силового управления пневматическим роботом-манипулятором основана на вычислении сил взаимодействия с объектами внешней среды по изменению давления в исполнительных пневмоцилиндрах.

Дальнейшее развитие работы будет включать в себя:

- 1) описание кинематики и динамики гексапода с последующим решением прямой и обратной кинематических задач;
- 2) определение способа вычисления сил взаимодействия собираемых деталей по давлению в исполнительных пневмоцилиндрах;
- 3) синтез методов выделения отдельных составляющих суммарной силы взаимодействия собираемых деталей.

Результаты, полученные в данной работе, будут использованы при создании динамической

имитационной модели, описывающей работу сборочного робота-манипулятора с позиционно-силовым управлением.

### Библиографический список

1. **Егоров И.Н.** Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 192 с.
2. **Щербак И.Н.** Использование силомоментных датчиков в системах управления манипуляторами. Энергетика // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2003. № 4. С. 34—41. DOI.org/10.21122/1029-7448-2003-0-4-34-41.
3. **Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю.** Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях / под. ред. В.С. Гурфинкеля и Е.А. Девянина. М.: Физматлит, 1994. 368 с.
4. **Письменный Г.В., Солнцев В.И., Воротников С.А.** Системы силомоментного оцувствления роботов. М.: Машиностроение, 1990. 93 с.
5. **Hogan N.** Impedance control: an approach to manipulation. Part I theory // Journal of dynamic systems, measurement and control. 1985. P. 1—7.
6. **Рыбак Л.А., Ержуков В.В., Чичварин А.В.** Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры. М.: Физматлит, 2011. 148 с.

**Е.М. Кулешова** (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
**С.А. Поляков**, д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)  
E-mail: kuleshova.em@mail.ru

## Оценка ресурса опоры быстроходного вала червячной передачи при использовании подшипника скольжения

*Представлены способы повышения несущей способности опор скольжения. Показана возможность замены подшипника качения на подшипник скольжения на быстроходном валу червячного редуктора. Описана динамика автоколебаний, возникающих в червячной передаче, с последующей оценкой влияния пленкообразующих смазочных материалов на адаптационные свойства сопряжений скольжения. Проведен расчет ресурса сопряжений скольжения с учетом роста коэффициента динамичности.*

*The paper describes ways to increase the bearing capacity of sliding bearings. The possibility of replacing a rolling bearing with a sliding bearing on a high-speed worm gear shaft is shown. A description of the dynamics of self-oscillations occurring in the worm gear is given, followed by an assessment of the effect of film-forming lubricants on the adaptive properties of sliding pairings. The resource of sliding pairings is calculated taking into account the growth of the dynamic coefficient.*

**Ключевые слова:** пленкообразующие смазочные материалы, опора скольжения, несущая способность, червячная передача, автоколебания, ресурс, коэффициент динамичности.

**Keywords:** film-forming lubricants, sliding bearing, bearing capacity, worm gear, self-oscillation resource, dynamic coefficient.

### Введение

Один из основных критериев работоспособности опор скольжения (ОС) — минимально допустимая толщина смазочной пленки, разделяющей трущиеся поверхности [1]. Однако в реальных условиях работы механическое воздействие на поверхность конструкционного материала ОС происходит в условиях, когда смазочная пленка не может разделить контактирующие детали. Один из способов повышения работоспособности ОС — разработка наномодифицированных смазочных материалов, действие которых на контактные поверхности приводит к процессу пленкообразования, позволяющему существенно повысить несущую способность материалов ОС в условиях граничной и смешанной смазки [2].

Исследовали масло ТМ-5-18 с добавкой нанодисперсного коллоидного раствора частиц полититаната калия в олеиновой кислоте ("Стри-

бойл"), которое сравнивали с чистым маслом ТМ-5-18 при проведении стендовых испытаний. В рамках задачи повышения работоспособности приводных механизмов рассмотрены подшипники, которые могут быть заменены с подшипников качения на подшипники скольжения.

**Цель работы** — провести сравнительный анализ работоспособности опоры быстроходного вала со смазочными материалами различного состава.

Для оценки возможности применения подшипника скольжения на быстроходном валу червячной передачи определим: толщину гидродинамической пленки  $h_{\min}$  и несущую способность подшипника  $F_r$ , которые характеризуют работоспособность ОС. Расчет проводили, когда подшипник находился под воздействием постоянной по величине и направлению нагрузки и скорость относительного перемещения поверхностей трения в номинальном режиме была неизменна. Исходные данные для расчета в радиальной части: диаметр шейки вала

$d = 30$  мм; длина цапфы подшипника  $l = 12$  мм; частота вращения вала  $\omega = 1500$  мин<sup>-1</sup>; вязкость масла ТМ5-18  $\mu_{cp} = 0,104$  Па·с, относительный эксцентриситет  $\chi = 0,03$ , относительный зазор  $\psi = 8,33 \cdot 10^{-4}$ , коэффициент нагруженности  $\xi = 0,133$ .

Минимальная толщина смазочного слоя в радиальной части:

$$\begin{aligned}
 h_{\min} &= 0,5d\psi(1-\chi)10^3 = \\
 &= 0,5 \cdot 30 \cdot \frac{0,025}{30} (1-0,03) \cdot 10^3 = 12,13 \text{ мкм}.
 \end{aligned}$$

Несущая способность подшипника:

$$\begin{aligned}
 F_r &= \frac{\xi l d \mu_{cp} \omega}{\psi^2} = \\
 &= \frac{0,133 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 0,104 \cdot 157,07}{(8,33 \cdot 10^{-4})^2} = \\
 &= 1407,8 \text{ Н}.
 \end{aligned}$$

Исходные данные для расчета в осевой части: частота вращения пяты  $\omega = 25$  с<sup>-1</sup>; нагрузка на подпятник  $W = 822,6$  Н; число несущих поверхностей  $n = 6$ ; длина наклонной поверхности  $b = 0,021$  м; приведенный радиус подпятника  $R_{пр} = 0,027$  м; средняя ширина несущей поверхности  $l = 0,0238$  м; безразмерный коэффициент нагруженности  $\xi = 0,302$ .

Минимальная толщина смазочного слоя в осевой части:

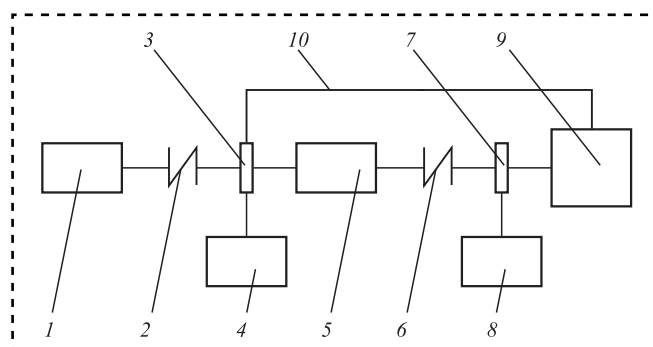
$$\begin{aligned}
 h_{\min} &= l \left( \frac{\mu_{cp} \omega R_{пр} b n \xi}{W} \right) 10^6 = \\
 &= 0,0238 \cdot \left( \frac{0,104 \cdot 25 \cdot 0,027 \cdot 0,021 \cdot 6 \cdot 0,302}{822,6} \right) \cdot 10^6 = \\
 &= 13,6 \text{ мкм}.
 \end{aligned}$$

Полученная толщина смазочного слоя в условиях стационарного режима работы, т.е. в условиях гидродинамического режима смазывания, достаточна, больше выступов шероховатостей, а несущая способность больше эксплуатационной, следовательно, подшипник скольжения является работоспособным. Проблемным является переходный период от гидродинамического режима смазывания к смешанному, когда интенсивность изнашивания существенно возрастает, делая сочетание подшипника скольжения со штатным маслом неработоспособным. Тогда приобретает смысл введение к смазочному материалу пленкообразующей добавки "Стрибойл".

## Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Схема лабораторного стенда, на котором проводятся испытания червячных редукторов, показана на рис. 1.

Предварительно притертую червячную пару устанавливают в редуктор, заливают масло, включают электродвигатель и начинают постепенно повышать нагрузку, определяя сначала максимально допустимый нагружающий момент по резкому росту момента на быстроходном валу, а затем максимально допустимую нагрузку на редуктор путем ступенчатого нагружения, варьируя величину и длительность действия. Завершают испытания, разгружая редуктор и определяя максимально допустимую длительно действующую нагрузку на редуктор по минимуму коэффициента трения. Износостойкость червячной пары можно оценивать при испытаниях на этой нагрузке. Между значением нагружающего момента на тихоходном валу редуктора и характером изменения момента на быстроходном валу устанавливается обратная связь, позволяющая регулировать нагружение редуктора в предельном режиме и оценивать его эксплуатационные показатели. Типичный редуктор, который можно испытывать на этом стенде, — редуктор 5Ч-80. Стендовые испытания проводили с варьированием трех фак-



**Рис. 1. Схема устройства для проведения ускоренных испытаний червячных редукторов:**

1 — электродвигатель; 2 — муфта; 3 — устройство для измерения вращающего момента на быстроходном валу редуктора; 4 — устройство для построения графика изменения вращающего момента на быстроходном валу редуктора в режиме реального времени; 5 — редуктор; 6 — муфта; 7 — устройство для измерения вращающего момента на тихоходном валу редуктора; 8 — устройство для построения графика изменения вращающего момента на нагружающем устройстве в режиме реального времени; 9 — нагружающее устройство и устройство для регулирования нагружающего момента; 10 — механизм обратной связи, позволяющий регулировать нагружающий момент в зависимости от изменения вращающего момента на быстроходном валу редуктора





торов: 1) качества смазочного материала (один из которых был наномодифицированный пленкообразующий смазочный материал); 2) тормозного момента, нагружающего редуктор (использовали два варианта — без включения тормоза, когда нагрузка формировалась за счет конструкции стенда и с включенным тормозом при одноступенчатой фиксированной нагрузке); 3) замены подшипника качения на подшипник скольжения.

Описания колебаний в червячных редукторах присутствуют в ряде известных исследований. В них использованы представления о вынужденных колебаниях. Так, в работе [2] принято, что возбуждение колебаний происходит по причинам кинематического характера и вызвано погрешностями изготовления и монтажа, приведенными к линии зацепления. Воспользуемся моделью, основанной на представлениях об автоколебаниях. Динамика автоколебаний, если рассматривать червячное зацепление, определяется соотношением угловой скорости зуба червячного колеса  $d\varphi_2/dt$  в направлении приложения окружной силы на червяке и угловой скорости движения витка червячного вала  $\omega_0$  в процессе совершения колебаний:

$$J_2 d^2\varphi_2/dt + K d^2\varphi_2/dt + C_f \varphi_2 = F(\omega_0 - d^2\varphi_2/dt), \quad (1)$$

где  $\varphi_2$  — угол поворота зуба червячного колеса в направлении приложения окружной силы на червяке;

$J_2$  — приведенный момент инерции тихоходного вала;

$K$  — характеристический коэффициент, определяемый трением в контакте, или коэффициент демпфирования;

$C_f$  — жесткость зуба червячного колеса в направлении приложения окружной силы на червяке;

$F$  — функция изменения силы трения в связи с отношением угловой скорости червяка  $\omega_0$  и скорости поворота зуба червячного колеса  $d^2\varphi_2/dt$  которая описывает динамику окружной силы на червяке, определяемой именно силой трения.

В случае подшипника скольжения может быть предложено аналогичное уравнение, где угол  $\varphi_2$  будет соответствовать углу поворота вкладыша подшипника скольжения. В данном соотношении необходимо учитывать случайные составляющие, обусловленные отклонениями формы контактирующих поверхностей. Экспериментальные данные о поведении быстроходного вала получают методом тензометрирования вращающихся моментов на быстроходном и

тихоходном валах с помощью упругой подвески. На быстроходном валу этот прием выполнен с помощью упругой подвески электродвигателя. Обработка этих данных, проводимая с помощью амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), соответствует модельному уравнению, решение которого можно представить в виде:

$$T(\varphi_1(t)) = A \cos(\omega t) + z_1(A, t)d_1 + F_0 \left( \sum F_k [\Phi(\delta\varphi_k) \cos(\pi/T_u)t] \cos(\omega_k t) \right) d_1, \quad (2)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний вращающего момента;

$T_u$  — период взаимодействия погрешностей червяка и колеса.

Последний член уравнения (2) является составляющей, слабо зависящей от скорости проскальзывания.

Анализ экспериментальных данных и получение амплитудно-частотных характеристик осуществляли с помощью быстрого преобразования Фурье [3]:

$$F(k) = F_0(k) + W_N^k F_1(k), \quad k = 0 \dots N/2 - 1;$$

$$F(k + N/2) = F_0(k) + W_N^k F_1(k), \quad k = 0 \dots N/2 - 1,$$

где  $N$  — число дискретных значений сигнала;

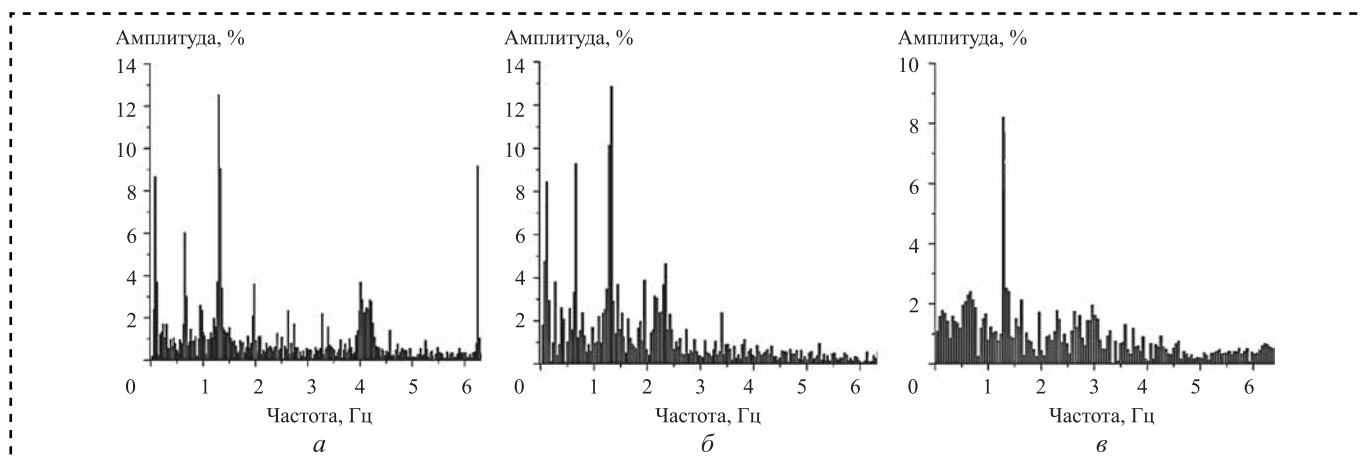
$W_N^k = \exp(-i2\pi/Nnk)$  — поворачивающий множитель.

В результате выявлена доминирующая мода колебаний, соответствующая автоколебаниям, с частотой 1,6 Гц, что невозможно объяснить дефектами (погрешностями изготовления), поскольку зубцовая частота при частоте вращения вала свыше  $1000 \text{ мин}^{-1}$  должна быть не менее 15 Гц. Кроме того, выявлен ряд составляющих от взаимодействия погрешностей. Экспериментальные данные, полученные при стендовых испытаниях, разбили на два основных раздела:

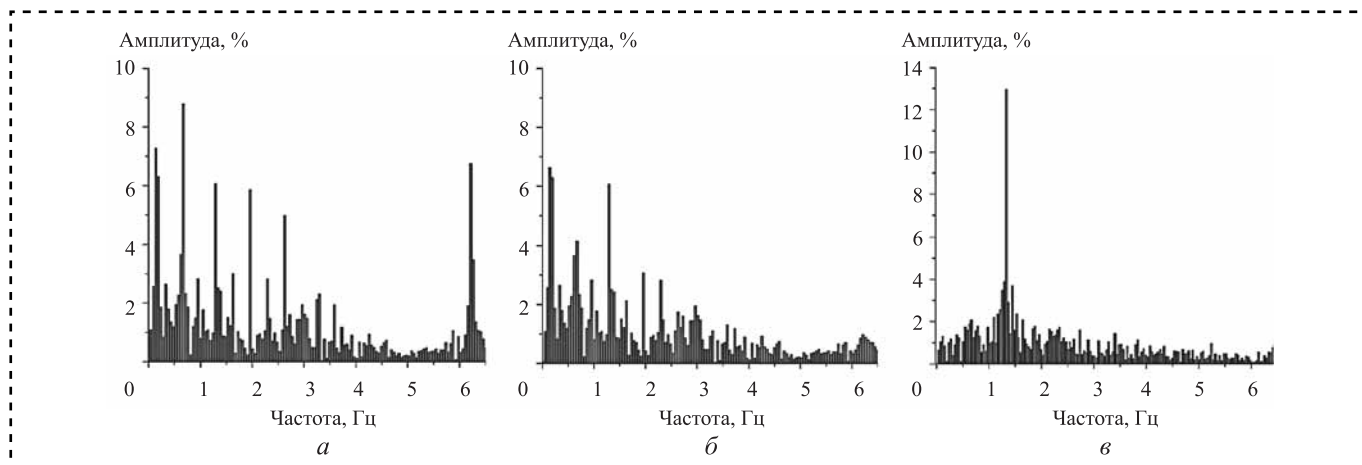
1) АЧХ быстроходного вала с подшипником скольжения и минеральным маслом (рис. 2) — при увеличении нагрузки пропадают пики в области высоких частот, сохраняется постоянный пик в районе 1,2 Гц;

2) АЧХ быстроходного вала с подшипником скольжения и добавкой "Стрибойл" (рис. 3) — после увеличения нагрузки уменьшаются амплитуды в области высоких частот, сохраняется несколько пиков в области низких частот, после приработки тенденция сохраняется.

Экспериментальные данные стендовых испытаний позволяют оценить, как влияют



**Рис. 2. АЧХ быстрогоходного вала с подшипником скольжения и минеральным маслом:**  
*a* — при отключенном тормозе; *б* — при нагрузке 30 Н·м; *в* — при нагрузке 40 Н·м



**Рис. 3. АЧХ быстрогоходного вала с подшипником скольжения и добавкой "Стрибойл":**  
*a* — при отключенном тормозе; *б* — при нагрузке 40 Н·м; *в* — при нагрузке 40 Н·м после приработки

изменяемые в эксперименте факторы на АЧХ быстрогоходного вала и, как следствие, на работу редуктора.

Первый вариант (подшипник скольжения + минеральное масло) показал, что применение подшипника скольжения вместо подшипника качения приводит к существенному расширению спектра колебаний, что обусловлено появлением дополнительных источников колебаний — это отклонения формы и шероховатости в подшипнике скольжения, которые могут оказывать влияние на спектр АЧХ до окончания приработки.

Второй вариант (подшипник скольжения + добавка "Стрибойл") на начальной стадии при малых нагрузках аналогичен первому варианту. Однако повышение нагрузки и процесс приработки (даже кратковременной) дает существенное уменьшение высокочастотных составляющих, в частности, ликвидацию выбросов на частоте 6,3 Гц, а также уменьшение амплитуд колебаний

и сдвиг основных выбросов амплитуды момента в низкочастотную область (0,3 и 0,6 Гц).

Для того чтобы оценить влияние смазочного материала на сопряжение скольжения, определим ресурс подшипников с учетом динамических нагрузок, используя экспериментальные данные.

### Оценка ресурса сопряжений скольжения с учетом динамических нагрузок

Показатель динамичности для быстрогоходного вала можно ввести в виде коэффициента прироста динамичности быстрогоходного вала [6]:

$$K_d = 1 + \Delta T_{\text{эд}}, \quad (3)$$

где  $\Delta T_{\text{эд}}$  — абсолютное значение прироста момента  $T_{\text{эд}}$  в процессе колебаний, которое формируется преимущественно за счет автоколебаний,

соотнесенное с величиной  $T_{\text{тор}}$ , которое является текущим значением тормозного (нагружающего) момента на достигнутой ступени нагружения.

Анализ зависимости амплитуды колебаний момента на быстроходном валу от тормозного момента при применении подшипника скольжения в сочетании с чистым минеральным маслом и минеральным маслом с добавкой "Стрибойл" позволяет построить график, представленный на рис. 4.

По мере роста тормозного момента значение момента на быстроходном валу, выраженное в относительных единицах, увеличивается, так как эта величина соответствует силе трения, данное явление согласуется с диаграммой Герси—Штрибека (коэффициент трения скольжения в условиях граничной смазки с ростом нагрузки растет экспоненциально). По мере повышения антифрикционных свойств смазочного материала амплитуда  $T'_{\text{эд}}$  уменьшается, таким образом, в соответствии с формулой (3) происходит и сниже-

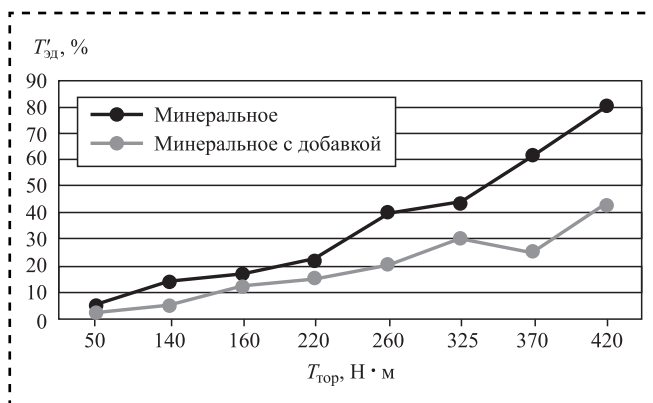


Рис. 4. Анализ зависимости амплитуды колебаний момента на быстроходном валу от тормозного момента:

$T'_{\text{эд}} = \frac{T_{\text{max}}}{T_{\text{эд}}} \cdot 100 \%$ , где  $T_{\text{max}}$  соответствует максимальному значению размаха колебания момента на рис. 2, 3

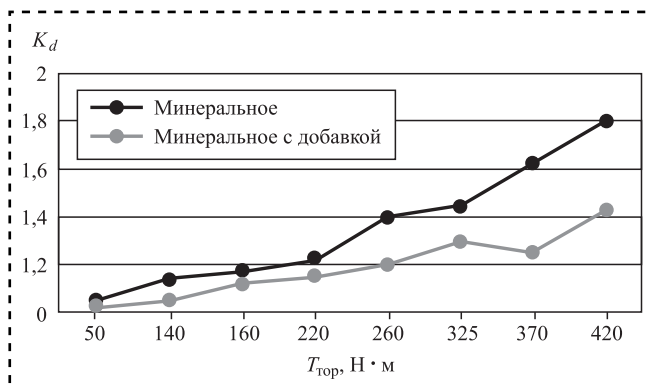


Рис. 5. Зависимость коэффициента динамичности быстроходного вала от тормозного момента

ние коэффициента динамичности быстроходного вала, что, в свою очередь, приводит к повышению предельно допустимого износа и к увеличению ресурса по критерию изнашивания.

Основная причина внутренней динамичности зубчатых передач — контактные процессы в зацеплении, которые могут вызвать процесс автоколебаний [6]. В связи с этим наибольший интерес представляет поведение вращающего момента на быстроходном валу, который играет роль силы трения по отношению к тормозному моменту. Динамика вращающего момента на быстроходном валу существенно зависит от силы трения в контакте, т. е. от внутренней динамичности передачи. Данные, представленные на рис. 4, позволяют построить аналитические зависимости  $K_d$  от нагрузки (рис. 5).

Используя зависимости, изображенные на рис. 5, посчитаем остаточный ресурс сопряжения скольжения, учитывая рост коэффициента динамичности. В связи с тем, что предельно допустимый износ изменяется обратно пропорционально росту  $K_d$ , предложенная зависимость имеет вид:

$$T = \frac{\Pi}{JvK_d},$$

где  $v$  — скорость относительного скольжения;

$\Pi$  — предельный износ;

$J$  — интенсивность изнашивания.

Первоначально необходимо определить нагрузки  $P_{\text{мп}}$  (максимальную нагрузку приработки) и  $P_{\text{оп}}$  (нагрузку, соответствующую минимуму коэффициента трения при эксплуатационном числе оборотов). Значение  $P_{\text{оп}}$  — важный показатель прирабатываемости и грузоподъемности, оно определяет критическое значение числа Зоммерфельда для перехода от гидродинамического режима к смешанной смазке при заданных значениях угловой скорости и вязкости масла. Определение этих величин регламентировано ГОСТ 23.215—84 и ГОСТ 23.224—86. При использовании минерального масла  $P_{\text{мп}} = 9$  МПа,  $P_{\text{оп}} = 6$  МПа, при использовании минерального масла с добавкой "Стрибойл" —  $P_{\text{мп}} = 30$  МПа,  $P_{\text{оп}} = 20$  МПа.

Осевая нагрузка на упорный подшипник составила в эксплуатации 4 кН или в пересчете на номинальное давление 5,2 МПа, поэтому оба варианта оказались принципиально допустимыми. Однако интенсивность изнашивания в условиях граничной смазки при смазывании минеральным маслом составляет  $6 \cdot 10^{-9}$ , при

смазывании маслом с добавкой —  $1 \cdot 10^{-11}$ . Для сопряжения с модифицированным смазочным материалом область перехода к граничной смазке лежит за пределами нагрузки  $P_{оп} = 20$  МПа, а такая нагрузка в эксплуатации заведомо невозможна по условиям работы. Для сопряжения с обычным индустриальным маслом эксплуатационная нагрузка близка к  $P_{оп} = 6$  МПа, в этом случае сопряжение работает преимущественно в условиях граничной и смешанной смазки. В то же время для сопряжения с минеральным маслом с добавкой условия граничной смазки наступят лишь при нагрузке более 18 МПа, что невозможно, либо в переходный период, который должен составлять не более 10 % от общего времени работы. При максимально допустимом износе, равном 25 мкм, который соответствует допуску торцового биения вала по ГОСТ 3325—85, и значениях интенсивности изнашивания в условиях граничной смазки при использовании минерального масла с добавкой "Стрибойл" и масла без добавки, рассчитаем ресурс подшипников скольжения при значении тормозного момента 260 Н·м по стандартной методике и по методике, учитывающей рост  $K_d$  (таблица).

Расчеты показывают, что значения ресурса при использовании разных методик отличаются. С учетом изменения скорости роста коэффициента динамичности фактическое значение ресурса получается ниже, чем без его учета. Без использования пленкообразующей добавки ресурс получается низкий и не соответствует нормативным требованиям, в то время как введение добавки приводит к его многократному увеличению. Это объясняется тем, что рост  $K_d$  приводит к пропорциональному увеличению фактической нагрузки, следовательно, и к увеличению времени работы в условиях граничной смазки. Таким образом, можно судить о положительном влиянии пленкообразующей добавки "Стрибойл" на динамические показатели сопряжения, которые в свою очередь приводят к увеличению ресурса.

**Значения ресурса сопряжений скольжения**

Расчетная формула	Ресурс $T$ , ч	
	Минеральное масло	Минеральное масло с добавкой "Стрибойл"
$T = \frac{\Pi}{Jv}$	17	10 000
$T = \frac{\Pi}{JvK_d}$	12	8333

## Оценка вероятности заедания

Предельный износ, определяющий ресурс передачи, ограничен заеданием. Для оценки вероятности заедания разработан подход, позволяющий оценить эту вероятность на основе статистических распределений показателей работоспособности, рассмотренных в ГОСТ 23.224—86. В числе этих показателей — нагрузка  $P_0$  или давление в подшипнике, соответствующее минимуму коэффициента трения  $f$ , т.е. критическому значению параметра Зоммерфельда  $Z_a$ . Кроме того, используется такой показатель, как температура масла, также соответствующая минимуму коэффициента трения  $f - T_{мк}$ . В качестве интегрального показателя можно использовать само критическое значение параметра Зоммерфельда  $Z_a$ , соответствующее данным параметрическим координатам —  $P_0$  и  $T_{мк}$ . Сопоставление среднего значения критерия Зоммерфельда, полученного в лабораторных условиях в точке так называемого второго минимума, и среднего значения этого критерия в наиболее тяжелом режиме в эксплуатации позволяет получить вероятность отказа по причине заедания:

$$P = \Phi[q(Z_a)],$$

где  $q$  — плотность вероятности.

В случае если плотность вероятности имеет нормальное распределение, нижний предел интеграла, с помощью которого определяется вероятность отказа  $t$ , можно вычислить по формуле

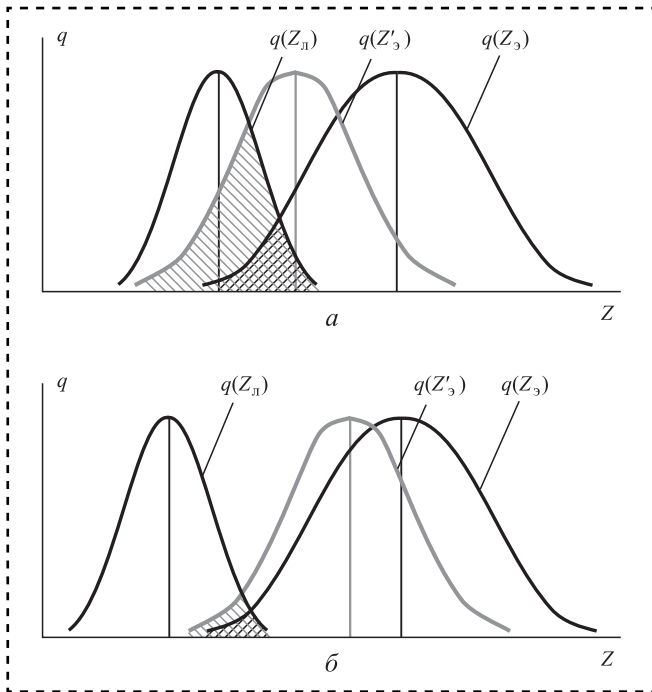
$$t = (Z_3 - Z_л) / \sqrt{s_3^2 - s_л^2},$$

где  $Z_3$  — минимальное среднее значение критерия Зоммерфельда в эксплуатации;

$Z_л$  — среднее значение критерия Зоммерфельда при лабораторных испытаниях, соответствующее "второму" минимуму коэффициента трения;

$s_3, s_л$  — среднеквадратические отклонения  $Z$  в эксплуатации и в лаборатории соответственно.

Необходимо провести пересчет критерия Зоммерфельда с учетом изменения коэффициента динамичности, который увеличивается с ростом изношенности в силу роста зазора между деталями — пропорционально росту зазора [4]. В результате обработки данных лабораторных испытаний и эксплуатации получены зависимости, отраженные на рис. 6. Измене-



**Рис. 6.** Распределение плотности вероятности заедания для различных значений параметра Зоммерфельда при использовании минерального масла (а) и минерального масла с добавкой "Стрибойл" (б) для лабораторных  $q(Z_n)$  и эксплуатационных условий  $q(Z_3)$  и эксплуатационных условий с учетом роста коэффициента динамичности  $q(Z'_3)$ ; заштрихованные области — диапазоны вероятного отказа

ние  $K_d$ , показанное на распределениях, соответствует росту  $K_d$  в результате изнашивания, что эквивалентно росту  $K_d$  в результате роста тормозного момента.

Значения параметра Зоммерфельда на рис. 6 изображены условно. Фактические значения составляют: для минерального масла —  $Z_n = 9,07 \cdot 10^{-8}$ ;  $Z_3 = 2,7 \cdot 10^{-6}$ ;  $Z'_n = 1,9 \cdot 10^{-6}$ ; для минерального масла с добавкой "Стрибойл" —  $Z_n = 2,7 \cdot 10^{-8}$ ;  $Z_3 = 2,7 \cdot 10^{-6}$ ;  $Z'_n = 2,25 \cdot 10^{-6}$ . Приведенные зависимости показывают, что вариант, в котором используется минеральное масло без добавки, характеризуется изначально более широким диапазоном вероятного заедания, который еще больше возрастает с ростом коэффициента динамичности, так как параметр Зоммерфельда для эксплуатационных условий снижается на 40 %. В случае применения добавки изначальный диапазон вероятности заедания меньше, но рост коэффициента динамичности также приводит к его увеличению, но в меньшей степени, так как параметр Зоммерфельда для эксплуатационных условий снижается только на 20 %. Таким образом, введение

пленкообразующей добавки приводит к уменьшению вероятности заедания.

## Заключение

Показано, что подшипник скольжения обладает необходимыми конструктивными и функциональными свойствами для работы в червячном редукторе, в том числе, такими важными преимуществами, как возможность самоустановки в пределах гидродинамических зазоров и демпфирования колебаний, возникающих в зацеплении. Основным недостатком подшипника скольжения в червячном редукторе является необходимость приработки, однако это особенность всех червячных редукторов в силу того, что в них необходимо прирабатывать червячное зацепление, которое прирабатывается дольше, чем подшипник скольжения. Введение в состав смазочного материала добавки "Стрибойл" улучшает спектр АЧХ, следовательно, приводит и к уменьшению скорости роста коэффициента динамичности, что в свою очередь, как подтверждают проведенные расчеты, приводит к существенному увеличению ресурса сопряжения и к уменьшению вероятности заедания.

## Библиографический список

1. Дьяков В.А., Воскресенский В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка). М.: Машиностроение, 1980. 224 с.
2. Поляков С.А., Кулешова Е.М., Хренникова И.А., Куксенова Л.И. Разработка и применение наномодифицированных смазочных материалов для повышения несущей способности материалов опор скольжения // IV Междисциплинарный научный форум с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии". 2018. С. 436–441.
3. Гороховский А.В., Палагин А.И., Аристов Д.В. Субмикро- и наноразмерные титанаты калия и перспективы их применения // Нанотехника. 2010. № 4 (20). С. 90–94.
4. Андриенко Л.А., Вязников В.А. Влияние изнашивания на динамические нагрузки в червячной передаче // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 9. С. 18–22.
5. Анализ контактного взаимодействия в червячных передачах в связи с разработкой модели их нелинейных колебаний / С.А. Поляков и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 11. С. 510–518.
6. Поляков С.А., Гончаров С.Ю., Куксенова Л.И. Разработка метода оценки работоспособности червячных передач на основе анализа их триботехнических показателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 5. С. 81–87.

М.Ш. Мигранов, д-р техн. наук, А.М. Мигранов

(Уфимский государственный авиационный технический университет),

E-mail: migmars@mail.ru, migranov\_art\_1993@inbox.ru

## Композиционные покрытия для режущего инструмента после ионного смешивания

Предложены пути повышения износостойкости "дуплексных" покрытий, нанесенных на режущие инструменты, за счет предварительного диффузионного насыщения поверхности инструмента азотом с последующим физическим осаждением твердого покрытия (Ti,Cr)N. Предлагаемое покрытие содержит дополнительный модифицированный слой с примесью ионов (металлы Ti, Zr, W и Al в комбинации с неметаллами N, C, и O), нанесенный на предварительно азотированную поверхность быстрорежущей стали до осаждения твердого покрытия. Наибольшая износостойкость после "триплекс"-обработки достигнута при ионной имплантации титана в предварительно азотированную поверхность. Определен коэффициент трения модифицированного слоя при различных контактных температурах. Показана улучшенная способность слоя с ионной смесью накапливать энергию упругой деформации. Ионное смешивание способствует появлению тонкого поверхностного слоя с аморфно-подобной структурой, которая продлевает стадию нормального износа, значительно увеличивающую период стойкости инструмента в результате процесса самоорганизации.

Ways of increasing the wear resistance of "duplex" coatings applied to cutting tools due to preliminary diffusion saturation of the tool surface with nitrogen followed by physical deposition of a hard coating (Ti, Cr)N are proposed. The proposed coating, in addition to the above, contains an additional modified layer with an impurity of ions (metals: Ti, Zr, W and Al in combination with three non-metals N, C, and O), applied to a pre-nitrided surface of high-speed steel before the deposition of a hard coating. The highest wear resistance after "triplex"-treatment was achieved by ion implantation of titanium into a pre-nitrided surface. The coefficient of friction of the modified layer is studied at different contact temperatures. An improved ability of a layer with an ionic mixture to accumulate elastic deformation energy is shown. Ionic mixing contributes to the appearance of a thin surface layer with an amorphous-like structure, which prolongs the stage of normal wear, significantly increasing the tool life as a result of the self-organization process.

**Ключевые слова:** режущий инструмент, композиционные покрытия, ионное азотирование, стойкость инструмента, износ, трение.

**Keywords:** cutting tools, composite coatings, ion nitriding, tool life, wear, friction.

### Введение

Режущие инструменты из быстрорежущей стали обычно работают в условиях интенсивного истирающего (абразивного) износа, где схватывание, связанное с наростом, происходит при взаимодействии инструмента с заготовкой [1–4]. Неизбежный износ покрытия ведет к интенсификации процесса истирания (схватывания), который сопровождается быстрым возрастанием интенсивности износа [1, 5, 6]. Следовательно, износ инструмента быстро входит в его катастрофическую стадию. Продление стадии нормального трения и износа было достигнуто применением дополнительного подслоя в многослойном "дуплексном" покрытии на поверхности подложки инструмента. Этот

слой ("триплексный") после "тройного процесса" сочетает желаемые защитные и антифрикционные свойства при взаимодействии с твердым покрытием-подложкой [7–10]. Способ создания таких слоев — процесс ионного смешивания в поверхностях режущих инструментов из быстрорежущей стали.

**Цель работы** — изучение поведения износа в режущих инструментах с "дуплексным" покрытием, которое дополнительно улучшено ионной смесью.

Исследование сосредоточили на изучении коэффициента трения и механических свойств модифицированного слоя, а также на изучении изменений химического состава и микроструктуры поверхности контакта "режущий инструмент—заготовка".



### Методика проведения эксперимента и полученные результаты

В работе рассмотрено новое "триплексное" покрытие. "Триплекс"-обработку выполняли в три стадии. Подложка из быстрорежущей стали Р6М5 содержала, %: 0,8...0,88 С; 5,0...5,5 W; 5,0...5,5 Mo; 3,8...4,2 Cr; 1,7...2,1 V; остальное — железо. Первоначально подложку азотировали методом тлеющего разряда. Перед нанесением твердого покрытия поверхность инструмента модифицировали ионной смесью. На модифицированный слой нанесли покрытие (Ti, Cr)N методом физического осаждения функциональных покрытий (ФОП).

Ионное азотирование подложки из быстрорежущей стали проводили в специальном устройстве NSV 6/10-11 с механической накачивающей системой, содержащей источники нагрева в виде тлеющего разряда и постоянных нагревательных элементов. Диаметр камеры — 1000 мм, высота — 2000 мм. Технологические параметры: плотность тока тлеющего разряда —  $3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ , напряжение смещения — 600 В, время азотирования — 0,5 ч, давление газа — 266 Па. Состав газа — 25 %  $\text{N}_2$  + 75 %  $\text{H}_2$  (разложившийся аммиак). Температура — 500 °С.

Твердое покрытие наносили с помощью стандартной катодной дуги в процессе ФОП в устройстве ННВ 6.6-11 с механической и диффузионной накачивающей системой при вращении образца в камере. Диаметр камеры — 800 мм, высота — 700 мм. Использовали два титановых катода и один хромовый. Расстояние между образцом и катодом составляло 200 мм. Параметры нанесения: давление реактивного газа (азота) —  $3 \cdot 10^{-1}$  Па, ток дугового разряда — 100 А, напряжение смещения подложки — 200 В, плотность тока подложки около  $15 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ , температура осаждения — 500 °С.

Перед осаждением покрытия образцы после ионного азотирования модифицировали ионной смесью из пяти комбинаций различных элементов на высокоэнергетической ионной установке (ионный имплантор) с энергией приблизительно 40 кэВ при комнатной температуре. Размер камеры устройства, оборудованной турбомолекулярной накачивающей системой, составлял  $50 \times 350 \times 1000$  мм. Расстояние между образцами и используемыми пластинами — около 10 мм. Комбинации металлов и неметаллов (Zr + N, W + C, W + N, Ti + N и Al + O) для ионной смеси выбраны в целях создания слоев с высокой износостойкостью. Типичные используемые дозы —  $8 \cdot 10^{17}$  ионов/см<sup>2</sup>. Плотность тока — 50 мА/см<sup>2</sup>. Перед ионным смешиванием изучаемых элементов выполняли травление поверхности элементов ионами аргона. Для уменьшения загрязнения поверхности при осаждении использовали низкотемпературный ловитель для обеспечения низкого фонового давления около  $2 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.

Микроструктура и свойства твердого покрытия и ионной азотированной подложки в зависимости от технологических параметров нанесения покрытий методом ФОП и ионного азотирования рассмотрены в работе [4]. Характеристики исследуемых многослойных покрытий приведены в табл. 1. Износ этих покрытий исследовали при точении углеродистой стали 40Х при скорости резания 70 м/мин, глубине резания 0,5 мм и подаче 0,28 мм/об с применением СОЖ в виде 5 % эмульсии и без нее четырехгранными быстросменными пластинками из быстрорежущей стали с многослойными покрытиями. Когда износ по задней грани режущей кромки превышал 0,3 мм, считали режущий инструмент непригодным для дальнейшего использования [2]. Эффективность ионной модификации (относительный период

Таблица 1

Характеристики исследуемых "триплексных" покрытий

Наименование слоя	Состав и структура слоя (РФЭС, ЭОС данные)	Микротвердость Н0,5, ГПа	Толщина, мкм
Твердое (Ti,Cr)N покрытие (ФОП)	(Ti, Cr)N	26...28	6...8
Модифицированный подслой с ионным смешением ( $\text{Ti}^{+\text{N}}$ )	Твердый раствор N в Ti	9,8	1
Ионно-азотированный подслой в быстрорежущей стали	Однофазный с высоким содержанием нитрида в мартенсите ( $\alpha\text{-Fe}$ )	11	30...32

Таблица 2

## Относительный период стойкости режущего инструмента с триплексным покрытием

Элементы смешивания	Относительный период стойкости	
	Без охлаждения	С охлаждением
Al + O	3,0	—
Ti + N	4,0	2,5
Zr + N	0,53	—
W + N	0,4	—
W + C	1,33	—

стойкости инструмента (табл. 2) определяли при сравнении времени резания, необходимого для достижения определенного уровня износа, на инструментах с "триплексными" и "дуплексными" покрытиями. Провели восемь испытаний в условиях резания для каждого вида поверхностной модификации. Рассеяние результатов определения периода стойкости инструмента составило приблизительно 10 %.

Фрикционные свойства анализируемой трибопары определяли с помощью адгезиомера [3]. Между двумя полированными образцами из стали 40X твердостью 180 НВ устанавливали вращающийся индентор из материала режущего инструмента. Для моделирования идентичных условий механической обработки поверхность образцов нагревали электроконтактным способом в диапазоне температур 150...500 °С при приложенной стандартной нагрузке 2400 Н, приводящей к большому пластическому напряжению в области контакта. В качестве адгезионной составляющей коэффициента трения, соответствующей износу при низких и средних скоростях резания, типичных для применения инструмента из быстрорежущей стали [3], использовали параметр  $\mu$ . Его определяли как отношение сопротивления сдвигу адгезионных связей, которые образовались между образцом, сделанным из инструментального материала, и обрабатываемой деталью, к кратковременному пределу текучести более мягкой области контакта при заданной температуре. Значение  $\mu$  — мера сопротивления разрушению связей. Условия трения на поверхности режущего инструмента близки к условиям измерения значений параметра  $\mu$  [3].

Испытания нановдавливанием поверхности модифицированного слоя выполняли для азотированного ионами образца из быстрорежущей стали и образца с дополнительной ионной смесью. Микротвердость и работу упругопла-

стической деформации оценивали по зависимости между нагрузкой и перемещением, определенным с помощью прибора-наноиндентора МТИ-3М, управляемого компьютером. Использовали индентор Берковича. Перемещения вглубь измеряли с помощью электроники, и на основании этих измерений строили кривые углубления (индентации). На каждом образце выполняли тридцать измерений. Для определения средних кривых индентации использовали стандартные статистические методы. Рассеяние измерений микротвердости составило около 2 %. Экспериментальные кривые индентации близки к расчетным средним кривым, которые использовали для анализа. Полную работу упругой и пластической деформаций при испытании нановдавливанием модифицированных поверхностных слоев рассчитывали с помощью кривых индентации, построенных при приложении нагрузки и ее снятии и аппроксимировали полиномом третьего порядка. Параметр определения —  $R^2 = 1$ . Полную работу упругой и пластической деформации  $A$  определили интегрированием кривой нагрузки. Шаг интегрирования равен текущему шагу возрастания нагрузки — 200 мН. Диапазон нагрузок — 0...2500 мН. Работу упругой деформации  $A_e$  определили интегрированием кривой, построенной при снятии нагрузки. По полученным данным рассчитали коэффициент  $K_e$  как отношение работы упругой деформации к полной работе индентации. Этот параметр характеризует способность поверхности накапливать или хранить энергию в процессе индентации.

Фазовый состав слоя покрытия, полученного методом ФОП, и азотированной подложки исследовали с помощью рентгеновской дифракции (XRD) (см. табл. 1). Химический и фазовый составы поверхности модифицированных слоев, а также области контакта режущего инструмента и заготовки изучали посредством оже-электронной спектроскопии (ОЭС). Анализ расширенной тонкой структуры электронных спектров потери энергии (EELFAS) и вторично-ионную масс-спектрометрию (ВИМС) выполняли с помощью спектрометра VG ESCALAB MK2. Сканирующую спектроскопию (ОЭС) использовали для анализа состава поверхности фаски износа на косом срезе поверхности режущего инструмента на различных стадиях износа. В каждом из этих случаев для анализа выбирали несколько секторов размером 15×15 мкм. Частоту развертки телевизионного блока для первичных электронов использовали при диаметре луча 2000 Å. Оже-сигнал зарегистрировали





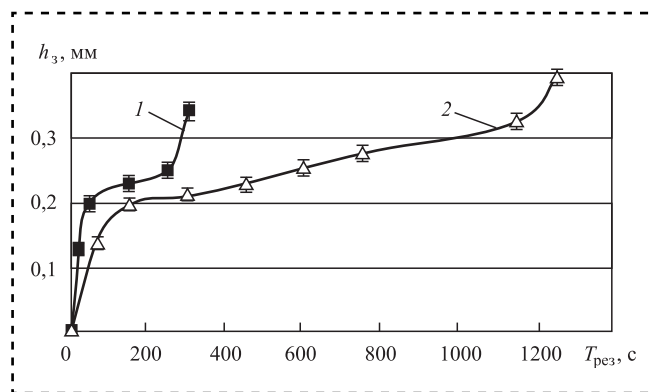
в режиме с набором CRR, установленным на 2 В, при скорости 2,1 эВ/с и с первичной энергией электрона 2500 эВ. Фазовый состав поверхности фаски износа проанализировали с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии для положительных ионов. С этой целью ионный луч аргона диаметром 0,5 мм осуществлял сканирование в режиме синхронизации с частотой развертки при ускоряющемся напряжении 5,0 кэВ и давлении аргона  $2 \cdot 10^{-5}$  Па. В этих условиях скорость травления ионами не превышала 0,5 монослоев в минуту. Анализ был сделан в режиме, близком к статическому.

Аморфные переходы и чисто структурные изменения исследовали у ближайших атомных соседей поверхности модифицированных образцов методом EELFAS. Это позволило выполнить анализ расширенной тонкой структуры электронных спектров близко к линии упругого рассеяния электронов. В последнее время этот метод, примененный в режиме отражения электрона, использовался для точных исследований атомной структуры в тонких поверхностных слоях. По аналогии с методом дополнительного поглощения рентгеновских лучей тонкой структурой (EXAFS) чистая структура электронных спектров содержит информацию о структуре ближайших атомных соседей на поверхности. Методы математической обработки спектров, принятые в EXAFS-спектроскопии, могут использоваться для анализа тонкой структуры электронных спектров, которые позволяют определить длины атомных связей.

Эти результаты хорошо согласуются с кристаллографическими данными. Спектры EELFS проанализировали в диапазоне 250 эВ близко к линиям первичного обратного рассеяния и *KLL*-линий для N, C и O. Электронные спектры зарегистрированы при скорости 0,4 эВ/с в интегральной форме в режиме CAE при аккумуляции сигнала с 10 уровнями развертки. Условия для анализа выбрали таким образом, чтобы гарантировать лучшее разрешение энергии при хорошем соотношении сигнал/шум. Энергия первичных электронов, используемых в этом случае, составляла 1500 эВ.

Результаты проведенных испытаний показали влияние ионного смешивания на период стойкости режущего инструмента в исследуемых условиях резания (см. табл. 2). Рабочая температура при этом находилась в пределах 600 °С. При использовании СОЖ температура снижалась на 100 °С с соответствующим увеличением периода стойкости инструмента [2].

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что лучшая износостойкость после "триплексной" поверхностной обработки достигнута



**Рис. 1. Влияние времени обработки на износ инструмента по задней поверхности:**

1 — ионное азотирование + (Ti, Cr)N; 2 — ионное азотирование + ионное смешивание + (Ti, Cr)N

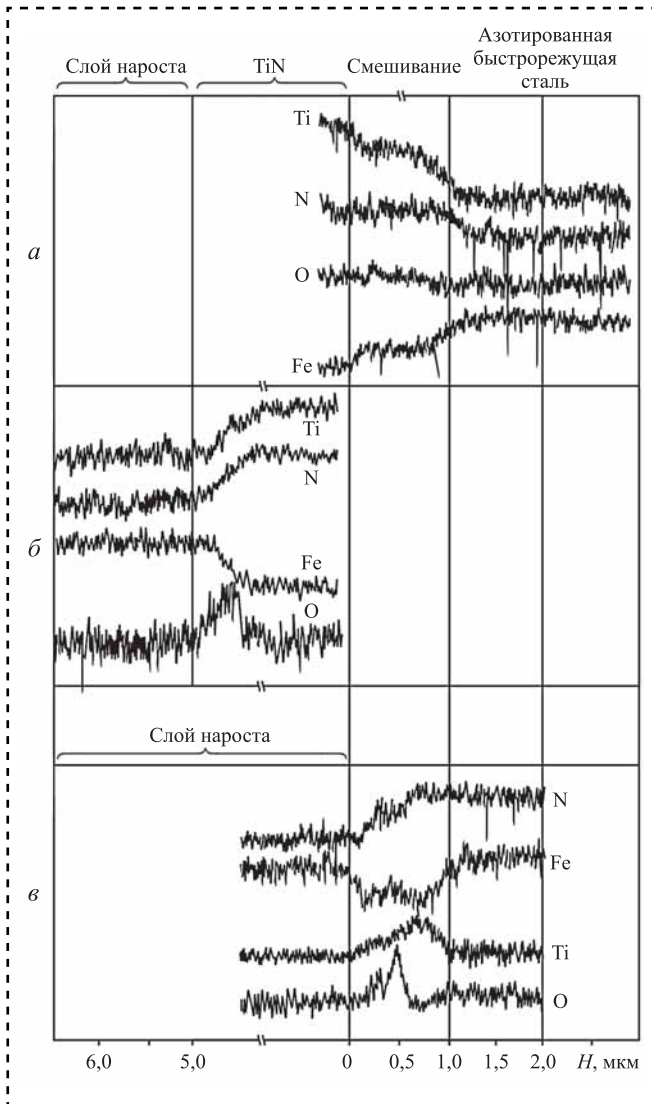
в ионно-модифицированном слое, содержащем Ti и N. Зависимость износа по задней поверхности от времени резания для режущего инструмента с "триплексным" покрытием представлена на рис. 1.

Толщина слоя смешивания, определенная по линии элементного распределения данных Оже-спектра, составила около 1 мкм (рис. 2, а).

Химический и фазовый составы ионно-модифицированного слоя изучили методами ЭОС и ВИМС (рис. 2 и 3). Представленные данные показывают, что ионно-модифицированный слой — это твердый раствор азота в титане (рис. 2, а). На поверхности модифицированного слоя также присутствует значительное количество кислорода (рис. 2, а и 3, а).

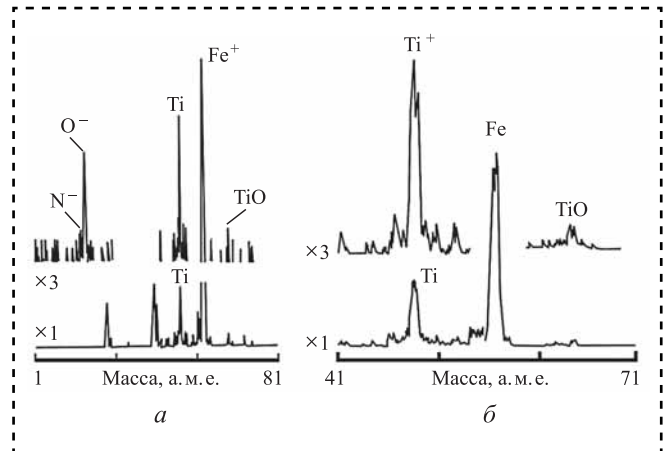
Исследования атомной структуры ионно-модифицированного слоя до ФОП-обработки провели методом EELFAS. На рис. 4 представлено преобразование Фурье для данных, полученных в результате анализа методом EELFAS поверхности, ионно-модифицированной титаном и азотом. Преобразование Фурье, содержит усредненную информацию о структуре ионно-модифицированного слоя после математической обработки электронного спектра. Для больших межатомных расстояний степень упорядоченности в кристаллической решетке мала, что доказывает наличие аморфных переходов в слое.

Исследование микротвердости, а также работы, связанной с упругой и пластической деформацией слоя, образованного при ионном смешивании, выполнили с помощью метода нановдавливания. На рис. 5 показаны кривые зависимости смещения от нагрузки для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования 1 и в случае ионного азотирования с ионно-смешанным слоем 2.

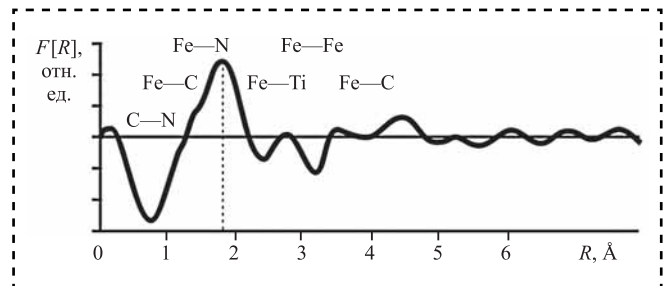


**Рис. 2. Линейное распределение элементов по поверхности режущего инструмента и пленки. Оже-спектры:**  
 а — после ионного смешивания азотированной поверхности быстрорежущей стали до эксплуатации; б — поверхность слоя покрытия (Ti, Cr)N после резания в течение 200 с; в — поверхность кратера износа после резания в течение 600 с

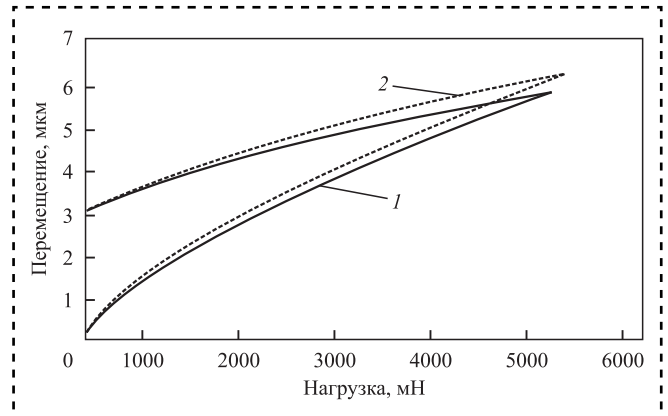
На рис. 6 представлены данные по микротвердости и коэффициенту  $K_e$  как отношение работы упругой деформации к полной работе индентации в зависимости от глубины вдавливания для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования и для ионного азотирования с ионно-смешанным поверхностным слоем. Микротвердость слоя толщиной 1 мкм, модифицированного смесью ионов, имеет значение 9,8 ГПа, которое ниже значения микротвердости для слоя, азотированного ионами, составляющего 11 ГПа. Однако есть незначительное различие в микротвердости обоих образцов для больших глубин индентации (рис. 6, а).



**Рис. 3. Спектры ВИМС реза из быстрорежущей стали с "триплексным" покрытием при резании:**  
 а — положительных ионов до работы; б — положительных ионов после резания в течение 600 с



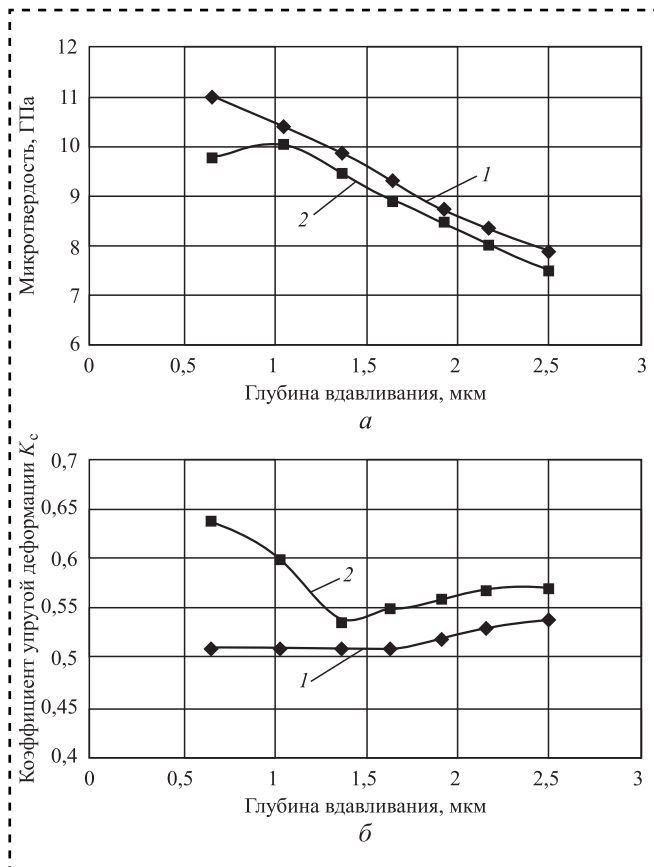
**Рис. 4. Преобразования Фурье данных EELFS пиков обратно рассеянных электронов с поверхности ионно-смешанного слоя**



**Рис. 5. Влияние нагрузки на перемещение образцов из быстрорежущей стали:**

1 — после ионного азотирования; 2 — после ионного азотирования + ионное смешивание

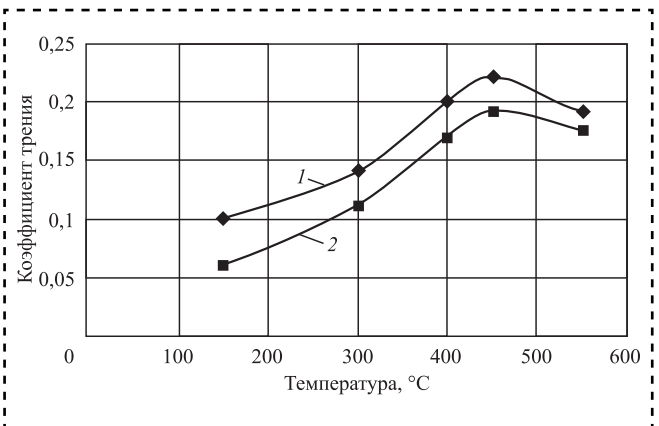
На рис. 6, б представлена зависимость коэффициента  $K_e$  от глубины индентации для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования с ионно-смешанным слоем и без него. Этот параметр намного выше (до 0,64) на поверхности ионно-модифицированного слоя, с более низкой микротвердостью по сравнению со слоем после ионного азотирования более 0,5.



**Рис. 6. Микротвердость (а) и коэффициент упругой деформации (б) в зависимости от глубины вдавливания для образцов из быстрорежущей стали:**  
1 — после ионного азотирования; 2 — после ионного азотирования + ионное смешивание

Обнаружено улучшение коэффициента трения благодаря ионному смешиванию (рис. 7). Различие оказалось более высоким для низких температур, но осталось значительным и для реальных температур резания.

Ионное смешивание — это один из основных процессов, используемых для получения необходимых размеров и кристаллографической ориентации зерна в процессе формирования пленок [1–4]. Процесс смешивания основан на добавлении нескольких элементов (в нашем случае Ti и N) в основу. Метастабильная фаза (см. рис. 2, а — твердый раствор азота в титане) образуется на поверхности ионно-модифицированной подложки из быстрорежущей стали. Минимальный нагрев подложки при ионном смешивании необходим для образования поверхностного слоя с нанокристаллической структурой и с аморфно-подобной структурой [9]. Процесс ионного смешивания нагревает формирующиеся пленки или поверхностные слои на атомном уровне, поэтому это явление называется нагревом на атомном уровне (НАУ) [8].



**Рис. 7. Влияние температуры на коэффициент трения для образцов из быстрорежущей стали с ионным азотированием (1) и ионным азотированием + ионное смешивание с (Ti + N) (2)**

Явление НАУ вызвано конденсацией напыленных атомов и последующего быстрого охлаждения на атомном уровне. Можно предположить, что образование аморфно-подобных структур на поверхности подложки — результат процесса НАУ при жестких неравновесных условиях ионного смешивания.

Очень важно, что ионная модификация ведет к улучшению свойств модифицированного слоя поверхности. Аморфно-подобная структура поверхностного слоя влияет на уменьшение коэффициента трения, что предотвращает интенсивное изнашивание инструмента. Этот слой имеет улучшенную способность накопления энергии упругой деформации, снижая вероятность образования трещин (см. рис. 6). Этот слой типичен для аморфноподобных структур при резании [29]. Улучшение этих параметров предотвращает интенсивное повреждение поверхности при переходе от нормальной стадии износа к катастрофической. Однако этих улучшений недостаточно для полного объяснения, почему ионное смешивание увеличивает период стойкости инструмента в несколько раз.

Необходимо рассмотреть этот вопрос с позиций трибологии и синергетики. Известно, что тонкие защитные пленки формируются на поверхности в результате процесса "самоорганизации" при трении [4, 5, 8]. Эти защитные пленки перенасыщены твердыми растворами кислорода, который поступает из окружающей среды. Аморфноподобная структура может быть сформирована также в результате реакции с материалом инструмента. Эти типы Ti—O-пленок образуются в верхних слоях поверхности исследуемого покрытия (Ti, Cr)N, полученного методом ФОП (см. рис. 2, б).

Начальная аморфно-подобная структура поверхности, обнаруженная после ионного смешивания (см. рис. 4), похожа на структуру



пленок, образованных на поверхности при трении. Быстрое образование защитных пленок наиболее вероятно при взаимодействии твердого покрытия с ионно-смешанным слоем при резании. Ионное смешивание улучшает процесс, который естественно развивается в трибосистеме в ходе самоорганизации и завершается формированием устойчивых защитных пленок. На конечной стадии процесса износа слоя, содержащего твердое ФОП-покрытие, который происходит приблизительно на 250-й с пути резания для "дуплексных" покрытий (см. рис. 1), кислород из окружающей среды проникает через многочисленные поры и достигает поверхности ионно-модифицированной подложки. Так как этот слой имеет очень высокую плотность точечных дефектов, то реакция с кислородом происходит очень быстро (см. рис. 2, в).

Таким образом, когда твердое покрытие полностью изношено, защитные трибопленки уже содержатся в поверхностных слоях. Эти пленки задерживают переход к катастрофической стадии износа инструмента, и трибосистема возвращается к стабильному состоянию износа (см. рис. 1). Благодаря этим эффектам период стойкости режущих инструментов из быстрорежущей стали, изготовленных по технологии "триплексного" покрытия, увеличился в 4 раза.

С точки зрения самоорганизации можно рассматривать как естественные процессы при трении, так и искусственные процессы, происходящие вследствие ионного смешивания. Поэтому попытка управлять искусственными процессами ионного смешивания, которые поддерживают эволюцию естественных процессов, имеющих место при трении, ведет к минимальной скорости износа. Это — типичное управление процессом трения с положительной обратной связью, которая значительно увеличивает период стойкости (срок службы) инструмента.

### Выводы

Рассмотрены некоторые способы улучшения "дуплексных" покрытий, полученных методом ФОП и нанесенных при двойной обработке поверхностного слоя инструмента. Этот процесс включает диффузионное насыщение азотом (ионное азотирование инструментов) из быстрорежущей стали и нанесение твердых покрытий (Ti, Cr)N методом ФОП. Покрытие содержит дополнительную модифицированную с помощью ионного смешивания подложку, причем ионное смешивание осуществляли на предварительно насыщенной ионами азота поверхности из быстрорежущей стали. Такие многослойные покрытия увеличива-

ют период стойкости инструмента в 3—4 раза за счет продления устойчивой стадии износа.

Исследовано влияние на период стойкости инструмента пяти пар элементов, добавленных в виде ионной смеси в основную поверхность подложки из быстрорежущей стали. Наилучшая износостойкость получена для "триплексного" покрытия с подложкой, содержащей ионную смесь (Ti + N).

Лучший эффект увеличения периода стойкости инструмента достигнут при образовании ионно-модифицированным слоем аморфно-подошной структуры, имеющей более низкий коэффициент трения, улучшенную способность накопления энергии упругой деформации, которые предотвращают глубокое повреждение поверхности. Это реализуется, когда применяется слой, модифицированный смесью (Ti + N) с помощью ионного смешивания. При резании трибопленки, содержащие кислород, интенсивно развиваются на поверхности ионно-модифицированного слоя, защищая режущий инструмент от износа. Это позволяет продлить устойчивую нормальную стадию износа и значительно увеличить период стойкости инструмента.

### Библиографический список

1. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. **Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш.** Интенсификация процесса механообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.
3. **Шустер Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 99 с.
4. **Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting / Fox-Rabinovich G.S. et al. // Wear. 1997. No. 206. P. 214.**
5. **Криони Н.К., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Издательство "Инновационное машиностроение", 2016. 377 с.
6. **Vereschaka A.A., Migranov M.S.** Study of wear resistance of sintered powder tool materials // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 871. P. 159—163.
7. **Vereschaka A., Migranov M., Vereschaka A., Sharipov O.** Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 10. No. 20. P. 9282—9286.
8. **Barsoum M.W., Yoo H.I., Polushina I.K.** Electrical Conductivity, Thermopower and Hall Effect of  $Ti_3AlC_2$ ,  $Ti_4AlN_3$  and  $Ti_3SiC_2$  // *Phys. Rev. B*. 2000. Vol. 62. P. 10194—10198.
9. **Shekhtman S.R., Suhova N.A.** Synthesis of Multilayer Vacuum Ion-Plasma Coatings Ti—TiN during the Surface Modification // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 870. P. 113—117.
10. **Migranov M.Sh., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shekhtman S.R.** Tribological Properties of Multilayer Coatings for Cutting Tool // *Journal of Friction and Wear*. 2018. Vol. 39. P. 245—250.
10. **Migranov M., Migranova R.** Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions // *Key Eng. Mater.* 2012. Vol. 496. P. 75—79.



**Б.М. Эрлих**, канд. техн. наук  
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)  
E-mail: uliaerlich@mail.ru

## Влияние ударного возмущения на состояние автоколебаний в машинах и механизмах в системе с различными типами нелинейностей сложной структуры

*Рассмотрена проблема воздействия ударного возмущения на нелинейную систему автоколебаний сложной структуры, которое вызывает действие силы малой продолжительности с мгновенным изменением скорости на конечную величину. За длительность ударного возмущения принята величина, кратная периоду автоколебаний. В целях улучшения состояния автоколебаний применяли внешнее силовое воздействие.*

*The problem of the impact of shock disturbance on a nonlinear system of self-oscillations of a complex structure, which causes the action of a short-duration force with an instantaneous change in speed by a finite value, is considered. For the duration of the shock disturbance, a multiple of the period of self-oscillations is used. In order to improve the state of self-oscillations, force impact is applied.*

**Ключевые слова:** изменение состояния автоколебаний, ударное возмущение, внешнее силовое воздействие, нелинейности сложной структуры, интегральная интенсивность воздействия, мгновенное изменение скорости, период автоколебаний.

**Keywords:** change in the state of self-oscillations, shock perturbation, external force impact, nonlinearities of complex structure, integrated intensity of the impact, instantaneous change in speed, self-oscillation period.

В статье изложена методика активного изменения состояния автоколебаний в машинах и механизмах при использовании силового воздействия. В дифференциальных уравнениях, описывающих динамику колебаний, учитывается наличие пассивных упругих и диссипативных нелинейностей сложной структуры. Колебания в таких системах имеют негармонический характер. Одновременно, в системе автоколебаний могут действовать внешние активные периодические возмущения: гармонические, импульсные и ударные. Проведем сравнительный анализ воздействия ударного возмущения на нелинейную систему автоколебаний сложной структуры, в которой возникает скачкообразное изменение скорости.

Дифференциальное уравнение динамики рассматриваемой системы автоколебаний имеет общий вид:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + f(x, \dot{x}) = u(x, \dot{x}), \quad (1)$$

где  $\omega_0^2 x$  — линейная составляющая упругой силы с частотой  $\omega_0$ ;

$f(x, \dot{x})$  — функция линейной и нелинейных составляющих упругой и диссипативной сил;

$u(x, \dot{x})$  — силовое виброгасящее воздействие с обратной связью, вводимое в систему для снижения интенсивности колебаний до минимально допустимого уровня с частотой  $\omega$ .

Разобьем функцию  $f(x, \dot{x})$  на отдельно упругую нелинейную часть  $f_1(x)$  и отдельно диссипативную линейную и нелинейную части  $f_2(\dot{x})$ :

$$f(x, \dot{x}) = f_1(x) + f_2(\dot{x}). \quad (2)$$

Для составляющих частей  $f_1(x), f_2(\dot{x})$  для проведения исследований по настоящей методике необходимо провести аппроксимацию по следующим формулам:

$$f_1(x) = -n_1 \text{sign}(x) + n_2 x \text{abs}(x) + n_3 x^3 + n_4 x^4; \quad (3)$$

$$f_2(\dot{x}) = 2\mu \dot{x} - k_1 \text{sign}(\dot{x}) + k_2 \dot{x} \text{abs}(\dot{x}) + k_3 \dot{x}^3 + k_4 \dot{x}^4, \quad (4)$$

где  $n_1, n_2, n_3, n_4$  — коэффициенты аппроксимации упругой нелинейности;

$k_1, k_2, k_3, k_4$  — коэффициенты аппроксимации диссипативной нелинейности;

$\mu$  — коэффициент линейной диссипативной части.

Такая аппроксимация позволяет оценить влияние функции упругой и диссипативной сил  $f(x, \dot{x})$  на интенсивность силового воздействия.

Для описания алгоритма расчета наличия ударного возмущения используем следующие обозначения:  $\Delta$  — скачок скорости при ударном возмущении;  $T = 2\pi l_k / \omega$  — период действия ударного возмущения, где  $l_k$  — коэффициент кратности периода относительно периода автоколебаний.

Будем считать, что ударное возмущение — это установившийся периодический режим с числом ударов  $n$  с периодом действия каждого удара.

Начальные условия первого удара с момента времени  $t^{(1)} = 0$  равны, соответственно,  $x_a, \dot{x}_a + \Delta$ , где  $x_a, \dot{x}_a$  — константы.

Время начала очередного удара:

$$t^{(i+1)} = t^{(i)} + T,$$

где  $i = 1, \dots, n$ .

Время окончания действия ударного возмущения

$$T_k = t^{(n+1)} = nT.$$

Конечные условия очередного удара  $x_b^{(i)}, \dot{x}_b^{(i)}$  определяются в процессе решения дифференциального уравнения (1). С их помощью рассчитывают начальные условия очередного удара:

$$x_a^{(i+1)} = x_b^{(i)}; \dot{x}_a^{(i+1)} = \dot{x}_b^{(i)} + \Delta. \quad (5)$$

В качестве активного воздействия на состояние автоколебаний используется внешнее силовое воздействие, которое обеспечивает снижение интенсивности колебаний и практически меняет характер автоколебаний на гармонический. Структура закона силового воздействия определена с помощью методов гармонической линеаризации и оптимального управления. Формула расчета закона силового воздействия:

$$u(x, \dot{x}) = (\omega_0^2 - \omega^2 + f_{1g}(A))x + f_{2g}(A)\dot{x}, \quad (6)$$

где  $f_{1g}(A), f_{2g}(A)$  — функции гармонической линеаризации соответственно нелинейностей  $f_1(x), f_2(\dot{x})$ , которые рассчитываются по формулам:

$$f_{1g}(A) = -\frac{4n_1}{\pi A} + \frac{8n_2}{3\pi}A + \frac{3n_3}{4}A^2 + \frac{32n_4}{15\pi}A^3, \quad (7)$$

$$f_{2g}(A) = 2\mu\omega - \frac{4k_1}{\pi A} + \frac{8k_2}{3\pi}\omega^2 A + \frac{3k_3}{4}\omega^3 A^2 + \frac{32k_4}{15\pi}\omega^4 A^3. \quad (8)$$

В формулах (6—8)  $A$  — дополнительный, требующий определения параметр размерности амплитуды. Для определения параметра  $A_*$ , с которого необходимо начинать поиск оптимального решения задачи состояния автоколебаний, т.е. гашение или возбуждение колебаний, предложено решить следующую задачу определения минимума:

$$A_* = \min_A \left[ (f_{1g}(A))^2 + (f_{2g}(A))^2 \right]. \quad (9)$$

Параметр  $A_*$  минимума условия (9) фактически является точкой минимальной интенсивности силового воздействия, а при условии  $\omega = \omega_0$  — точкой отсутствия силового воздействия. Выбор дополнительного значения параметра  $A_*$  обеспечивает увеличение (т.е. возбуждение) или уменьшение максимальной фактической амплитуды колебаний (т.е. гашение).

Таким образом, методика изменения состояния автоколебаний в машинах и механизмах при действии внешнего периодического ударного возмущения при активном силовом воздействии за время  $T_k$  сводится к решению дифференциального уравнения системы (1)—(9).

В качестве критериев оптимальности использовали максимальную фактическую амплитуду колебаний  $A^*$  и интегральную интенсивность силового воздействия:

$$Iu = \int_0^{T_k} (u(x, \dot{x}))^2 dt. \quad (10)$$

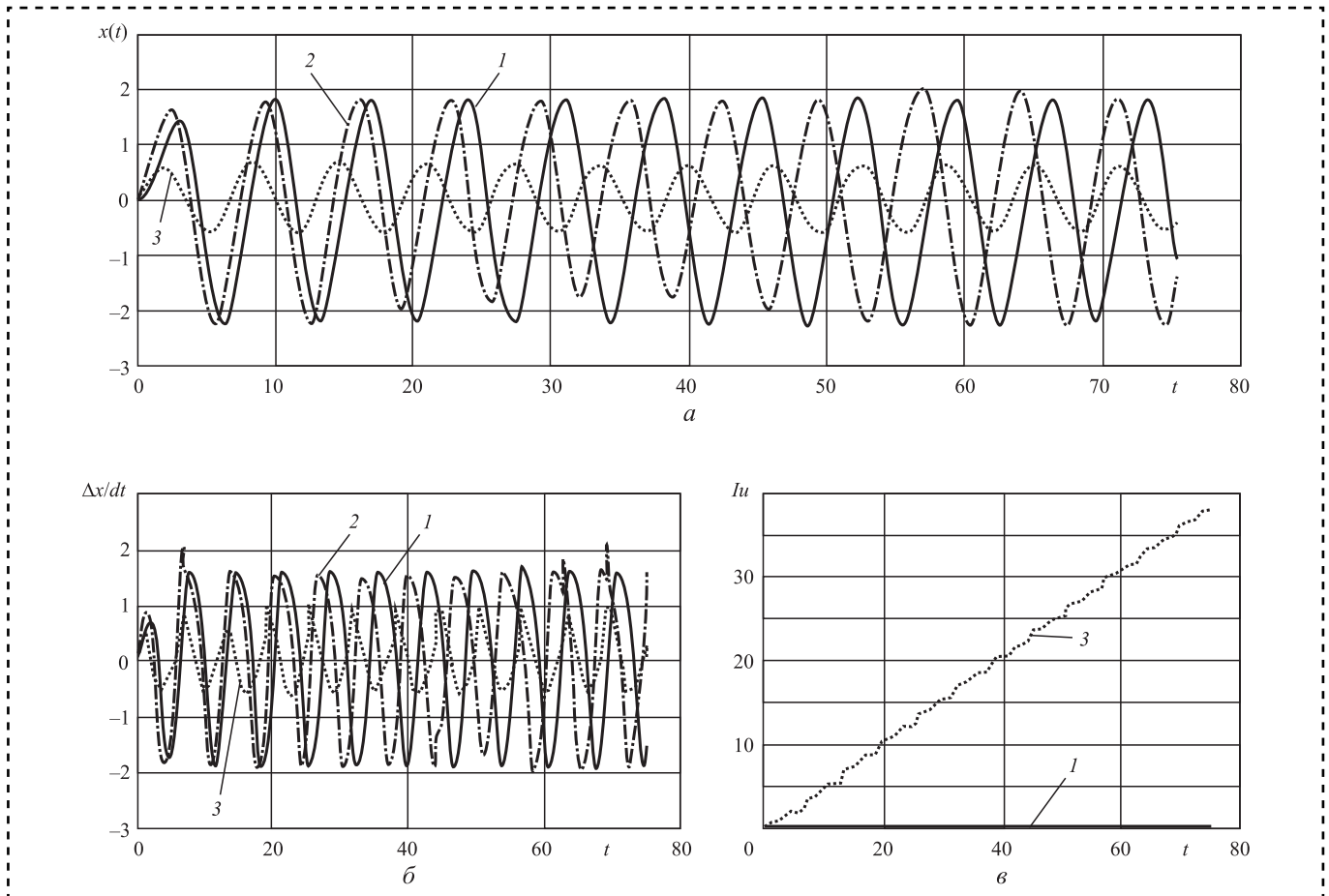
Показатели  $A^*, Iu$  рассчитывают путем определения максимума за заданное время  $T_k$  на основе полученных при решении дифференциального уравнения системы (1)—(10) зависимостей амплитуды колебаний  $x(t)$ , скорости колебаний  $\dot{x}(t)$  и интегральной интенсивности воздействия  $Iu(t)$ .

Для проверки работоспособности предлагаемой методики в целях изменения состояния автоколебаний при действии внешнего периодического ударного возмущения представлены варианты расчетов с использованием силового воздействия.

Основные неварьируемые параметры:

$$\omega_0 = 1,0; \mu = -0,5; k_1 = 0,3; k_2 = 0,1; k_3 = 0,5, \\ k_4 = 0,1; n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 0.$$

На рис. 1, 2 показаны зависимости от времени амплитуды колебаний  $x(t)$ , скорости колеба-



**Рис. 1.** Зависимости  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  и  $Iu(t)$ , оценивающие влияние ударного возмущения на состояние автоколебаний ( $\omega_0 = 1$ ;  $\mu = 0,5$ ;  $k_1 = 0,3$ ;  $k_2 = 0,1$ ;  $k_3 = 0,5$ ;  $k_4 = 0,1$ ;  $n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 1$ ;  $n = 12$ ;  $\omega = 1$ ;  $l_k = 1$ ):  
 1 –  $A = 1,529$ ;  $A^* = 2,254$ ;  $v^* = 1,93$ ;  $\Delta = 0$ ;  $I^* = 0$ ; 2 –  $A = 1,529$ ;  $A^* = 2,266$ ;  $v^* = 2,14$ ;  $\Delta = 0,5$ ;  $I^* = 0$ ;  
 3 –  $A = 0,5$ ;  $A^* = 0,682$ ;  $v^* = 1,11$ ;  $\Delta = 0,5$ ;  $I^* = 38,13$

ний  $\dot{x}(t)$  и интегральной интенсивности  $Iu(t)$  при отсутствии и наличии ударного возмущения. Параметры кривых 1 соответствуют случаю минимума условия (9) и отсутствию ударного возмущения. Параметры кривых 2 соответствуют случаю наличия ударного возмущения и также минимуму условия (9). Параметрам кривых 3 соответствуют значения дополнительного параметра  $A = 0,5$ , близкого к оптимальному, при использовании силового воздействия и также при наличии ударного возмущения.

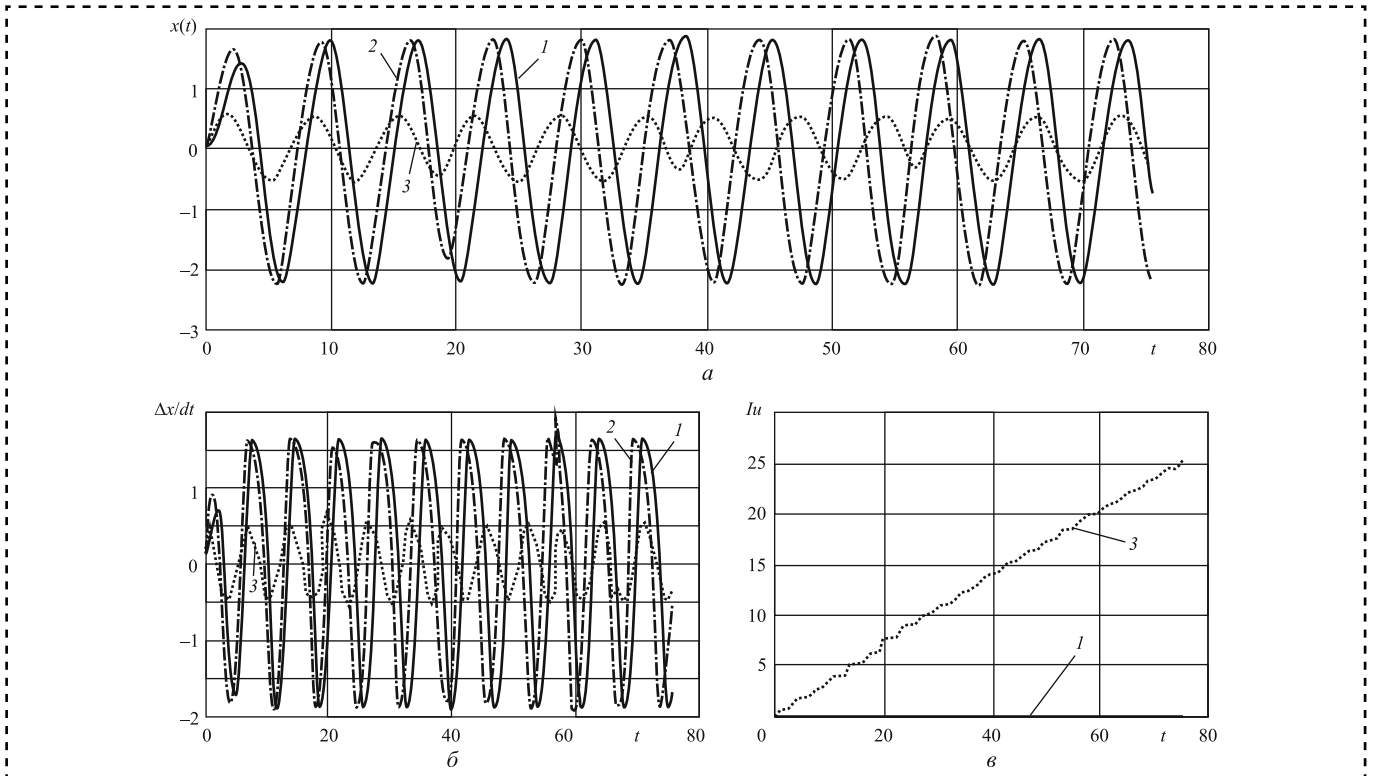
При отсутствии силового воздействия наличие ударного возмущения практически не меняет максимальную фактическую амплитуду  $A^*$  (см. рис. 1). Однако максимальная фактическая скорость за счет скачка скорости  $\Delta$  увеличилась на 11 %. Благодаря применению силового воздействия снизилась максимальная фактическая амплитуда в 3,4 раза, что привело к снижению интенсивности автоколебаний.

При этом потребовались энергетические затраты, а характер колебаний стал практически гармоническим.

На рис. 2 показан вариант расчета, когда при одинаковом времени действия ударного возмущения  $T_k \approx 80$  уменьшилось число ударов до  $n = 4$  и период действия возмущения увеличился за счет коэффициента кратности.

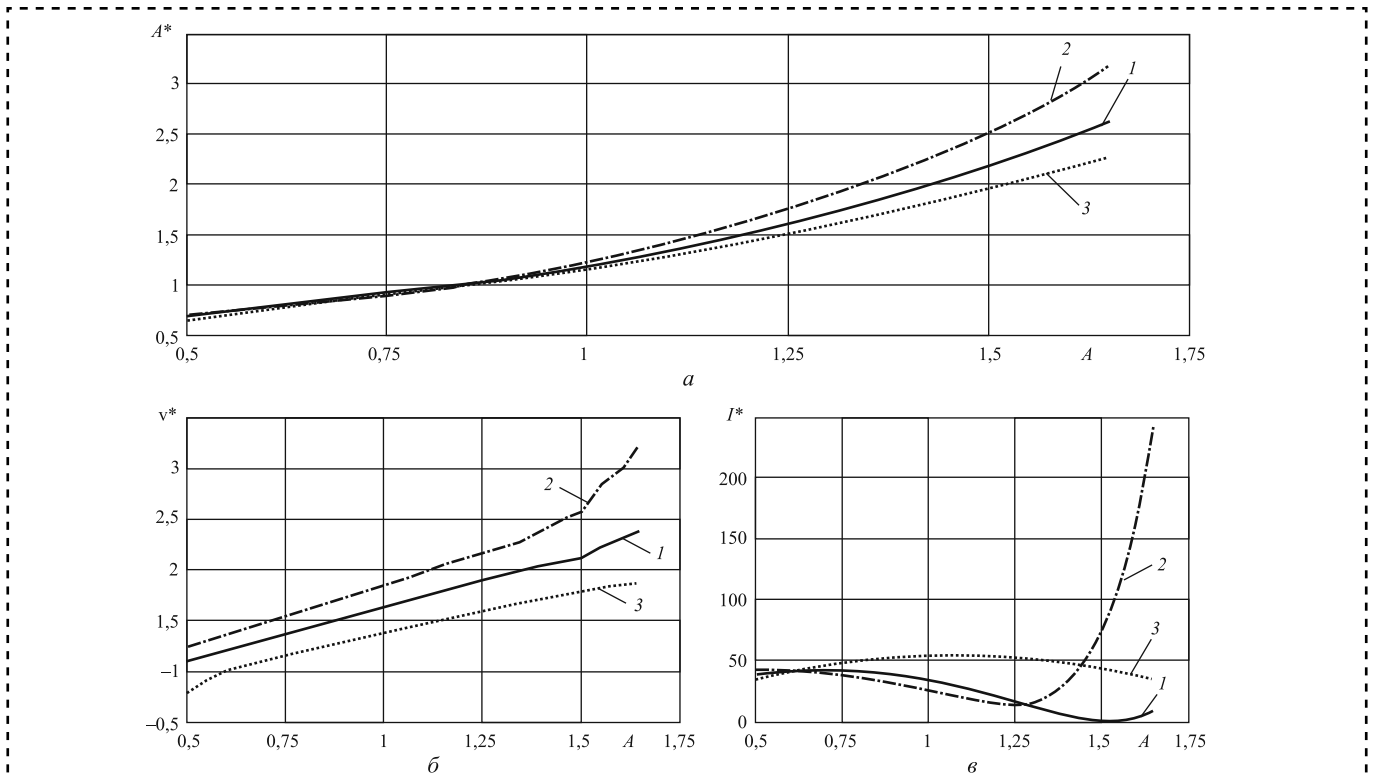
Из-за сокращения числа ударов ударного возмущения при силовом воздействии максимальная фактическая амплитуда увеличилась в 3,9 раза, что привело к повышению интенсивности колебаний на 18 % и сокращению энергетических затрат в 1,5 раза.

На рис. 3, 4 представлены итоговые зависимости за все время воздействия  $T_k$  фактических значений максимальной амплитуды колебаний  $A^*$ , максимальной скорости колебаний  $v^*$  и интегральной интенсивности  $I^*$  в широком диапазоне изменения дополнительного параметра.



**Рис. 2. Зависимости  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  и  $Iu(t)$ , оценивающие влияние ударного возмущения на состояние автоколебаний ( $\omega_0 = 1$ ;  $\mu = 0,5$ ;  $k_1 = 0,3$ ;  $k_2 = 0,1$ ;  $k_3 = 0,5$ ;  $k_4 = 0,1$ ;  $n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 0$ ;  $n = 4$ ;  $\omega = 1$ ;  $l_k = 3$ ):**

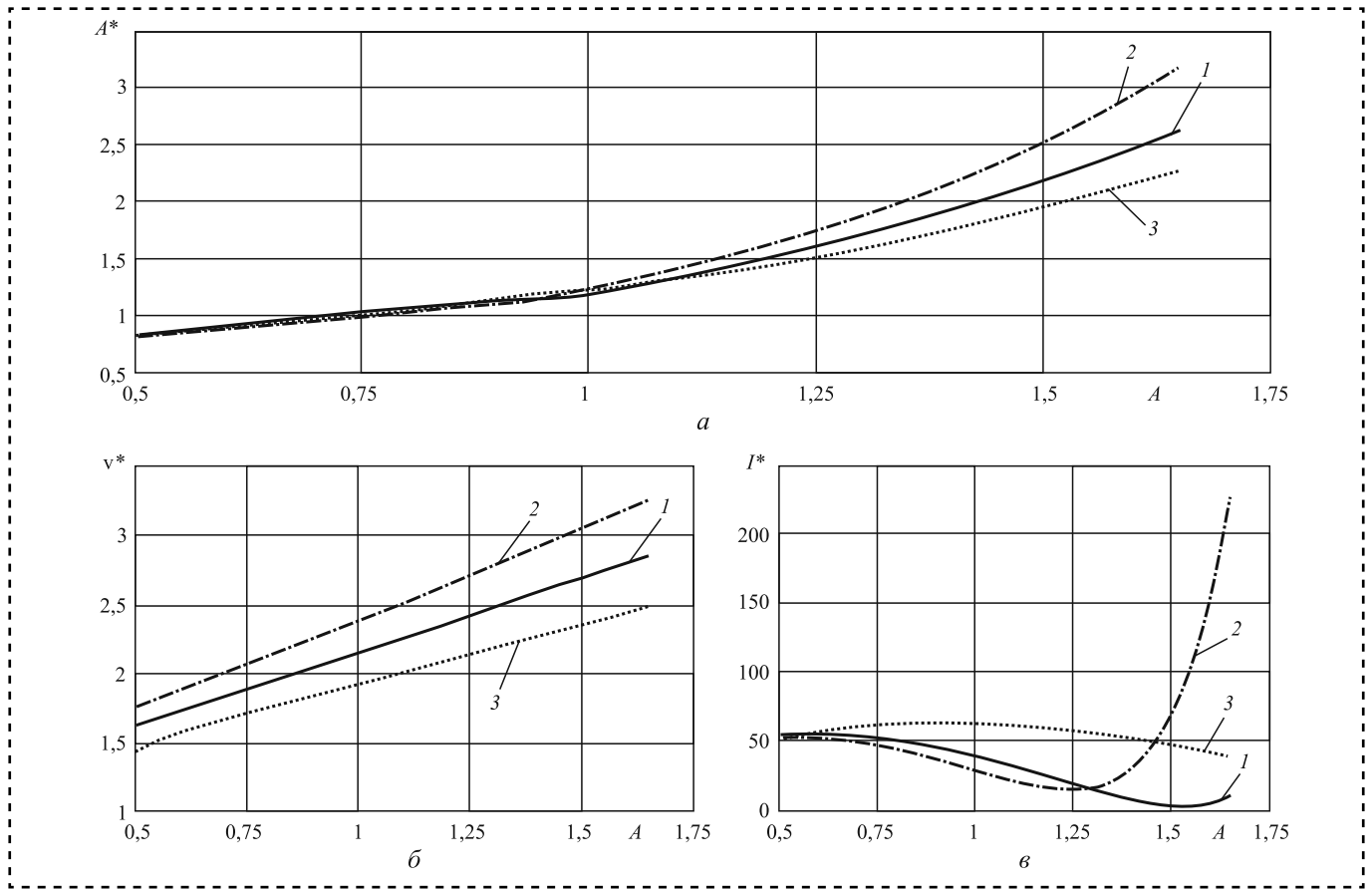
1 –  $A = 1,529$ ;  $A^* = 2,255$ ;  $v^* = 1,936$ ;  $\Delta = 0$ ;  $I^* = 0$ ; 2 –  $A = 1,529$ ;  $A^* = 2,257$ ;  $v^* = 1,955$ ;  $\Delta = 0,5$ ;  $I^* = 0$ ;  
3 –  $A = 0,5$ ;  $A^* = 0,575$ ;  $v^* = 0,62$ ;  $\Delta = 0,5$ ;  $I^* = 25,44$



**Рис. 3. Влияние силового воздействия с различными частотами  $\omega$  при наличии ударного возмущения с параметром скачка скорости  $\Delta = 0,5$  в диапазоне изменения дополнительного параметра  $A = 1,7...0,5$ :**

1 –  $\omega = 1,0$ ; 2 –  $\omega = 1,2$ ; 3 –  $\omega = 0,8$





**Рис. 4.** Влияние силового воздействия с различными частотами  $\omega$  при наличии ударного возмущения с параметром скачка скорости  $\Delta = 1,0$  в диапазоне изменения дополнительного параметра  $A = 0,5 \dots 1,7$ :

1 —  $\omega = 1,0$ ; 2 —  $\omega = 1,2$ ; 3 —  $\omega = 0,8$

Маркеры кривых соответствуют частотам силового воздействия  $\omega = 1,0; 1,2; 0,8$ .

Во всем диапазоне изменения параметра при действии силового воздействия наблюдали снижение максимальной амплитуды колебаний  $A^*$  в 3—4 раза и максимальной скорости  $v^*$  в 2—3 раза. Однако при уменьшении  $A$  от точки минимума условия (9) до некоторой точки наблюдали естественное повышение интегральной интенсивности силового воздействия. Дальнейшее уменьшение параметра из-за существенного уменьшения максимальной амплитуды приводит даже к падению интегральной интенсивности.

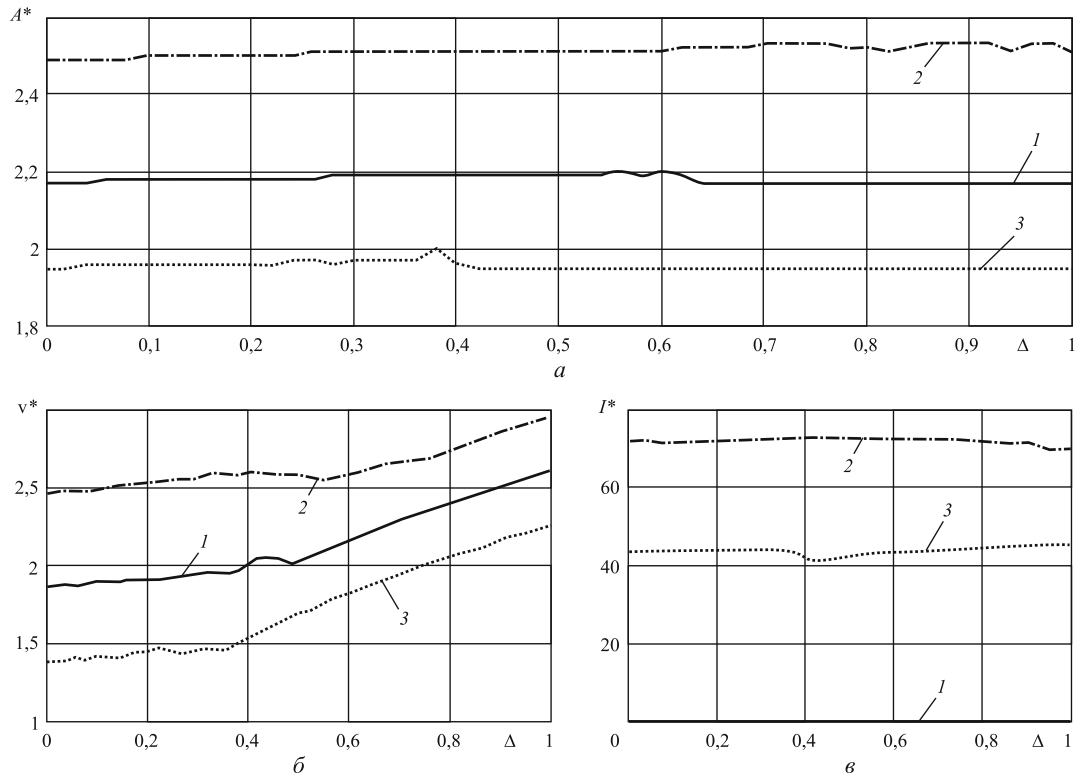
Сравнительный анализ изменения скачка скорости при ударном возмущении в 2 раза ( $\Delta = 0,5; \Delta = 1,0$ ) показал, что показатели максимальной амплитуды и максимальной скорости ухудшились на 20...25 и 15...30 % соответственно.

На рис. 5, 6 представлены итоговые зависимости за все время силового воздействия  $T_k$

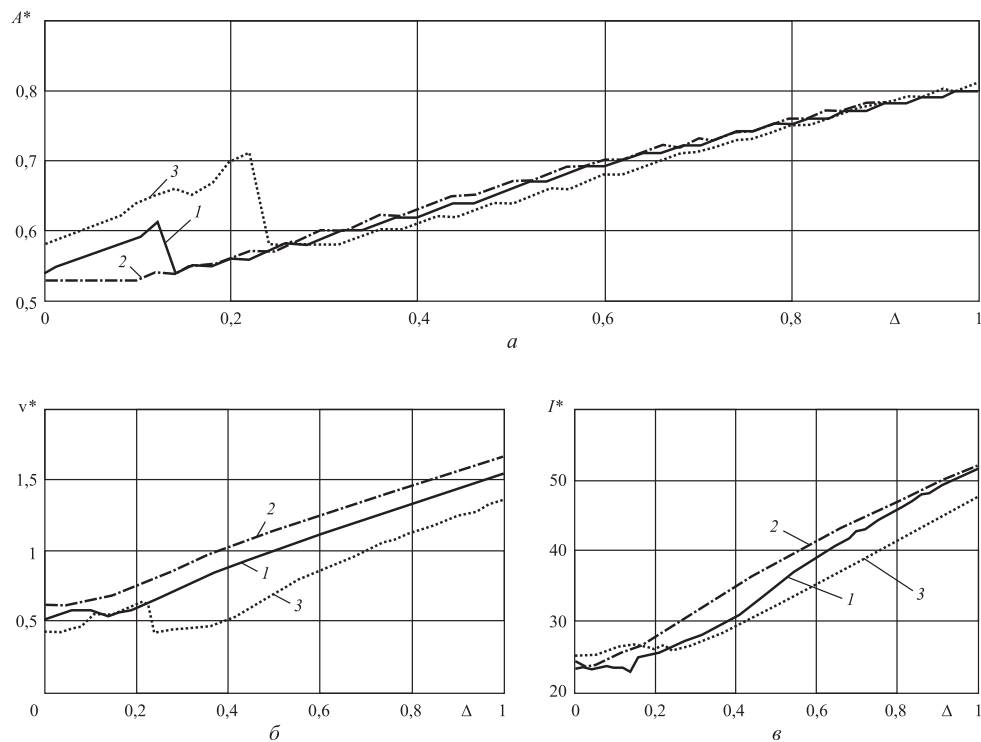
фактических значений максимальной амплитуды колебаний  $A^*$ , максимальной скорости колебаний  $v^*$  и интегральной интенсивности  $I^*$  при изменении скачка скорости ударного возмущения в диапазоне  $\Delta = 0 \dots 1,0$ . Дополнительный параметр  $A = 1,5$  близок к минимуму условия (9) (см. рис. 5), а  $A = 0,5$  близок к оптимальному значению (рис. 6).

Параметр  $A = 1,5$ , близкий к условию минимума (9), практически не меняет максимальную амплитуду колебаний и интегральную интенсивность силового воздействия во всем диапазоне  $\Delta = 0 \dots 1,0$ . Максимальная скорость колебаний без учета самого скачка ударного возмущения только замедляется.

Параметр  $A = 0,5$ , близкий к оптимальному значению, ухудшает показатели действия силового воздействия при наличии ударного возмущения, в частности максимальная амплитуда колебаний увеличивается в 1,3—1,5 раза, а интегральная интенсивность повышается примерно в 2 раза.



**Рис. 5.** Итоговые зависимости  $A^*$ ,  $v^*$ ,  $I^*$  при силовом воздействии с частотами  $\omega$  при скачке скорости ударного возмущения в диапазоне  $\Delta = 0 \dots 1,0$ :  
 1 —  $\omega = 1,0$ ; 2 —  $\omega = 1,2$ ; 3 —  $\omega = 0,8$



**Рис. 6.** Итоговые зависимости  $A^*$ ,  $v^*$ ,  $I^*$  при силовом воздействии с частотами  $\omega$  при скачке скорости ударного возмущения в диапазоне  $\Delta = 0 \dots 1,0$ :  
 1 —  $\omega = 1,0$ ; 2 —  $\omega = 1,2$ ; 3 —  $\omega = 0,8$



### Заключение

Проведен сравнительный анализ воздействия ударного возмущения на нелинейную систему автоколебаний сложной структуры, которое вызывает действие силы малой продолжительности с мгновенным изменением скорости на конечную величину. В качестве активного воздействия используется внешнее силовое воздействие, которое обеспечивает снижение интенсивности автоколебаний и изменяет характер колебаний на гармонический. Для проверки эффективности проведенного анализа используются два критерия оптимальности: максимальная фактическая амплитуда колебаний и интегральная интенсивность силового воздействия.

Результаты расчетов подтверждают работоспособность предлагаемого метода сравнительного анализа.

### Библиографический список

1. Израилович М.Я., Эрлих Б.М. Активное гашение периодических колебаний в системах с нелинейным демпфированием. М.: Издательство "Спутник", 2015. 38 с.
2. Израилович М.Я., Эрлих Б.М. Влияние вязкого трения на периодические режимы одномассовой системы под действием ударного возмущения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 8. С. 3—5.
3. Эрлих Б.М. Методика активного гашения и возбуждения колебаний в машинах и механизмах // Международная конференция, посвященная 80-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН: сборник тезисов конференции. Москва, 2018.

## ЧИТАЙТЕ В СЛЕДУЮЩЕМ НОМЕРЕ:

**Азарян Д.К., Челышев М.С., Шандыбина И.М., Полянчикова М.Ю.** Разработка и апробация методики оценки позиционной точности механизмов с одной и двумя степенями свободы с использованием компьютерного зрения

**Иванов А.А., Кретинин О.В.** Интеллектуальные сборочные системы

**Железникова О.Е., Амелькина С.А., Микаева С.А., Микаева А.С., Дюкин А.А.** Сборка кварцеводного стола и газовой горелки

**Головкин П.А., Логачёв А.В.** Эффективность горячего газостатирования прутков из сплава НВ5-ВП для изготовления деталей СВЧ-устройств

**Иванов В.Е., Пучков П.В.** Использование современных методов исследования при разработке новых конструкций зажимов для восстановления работоспособности напорных пожарных рукавов и оценка их технического состояния на основе компьютерного моделирования

**Колмаков К.М., Зверовщиков А.Е., Схиртладзе А.Г., Соколов А.В.** Определение параметров гетерогенной среды мишени при центробежно-дуговом диспергировании твердых сплавов

**Поляков С.А., Куксенова Л.И., Кулешова Е.М.** Оценка показателей динамичности и вероятности заедания тяжело нагруженных сопряжений скольжения с различными смазочными материалами

**Попов И.П.** Символическое представление вынужденных колебаний разветвленных механических систем

**Житников Ю.З., Лошкарев А.А.** Обоснование скорости ударного взаимодействия кулачков гайковерта для упрочнения их поверхностей на заданную глубину

**Новиков В.В., Осипов К.Н., Маврин С.А.** К вопросу моделирования сложных технических объектов морской номенклатуры



**М.В. Ноженков**, *д-р техн. наук*  
(ЗАО "Техном-Т", Москва)  
E-mail: nomtnt@yandex.ru

## Свойства вихревых структур при росте вакуумных ионно-плазменных покрытий\*

*Рассмотрена зависимость вихревого движения частиц в процессе нанесения на кристаллическую структуру и свойства получаемого вещества. Установлена возможность создания конденсированной среды с вихревыми квантовыми потоками частиц, движущимися без рассеяния энергии по эквипотенциальным поверхностям среды в виде подобных явлений (сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести, роста кристаллов в вакууме). Предложена модель роста кристаллов при нанесении покрытий.*

*The dependence of the vortex motion of particles in the deposition process on the crystal structure and properties of the obtained substance is found. The possibility of creating a condensed environment with vortex quantum flows of particles moving without scattering of energy along equipotential surfaces of the medium in the form of similar phenomena (super low friction, superconductivity, superfluidity, crystal growth in a vacuum) is established. A crystal growth model is proposed for the application of coatings.*

**Ключевые слова:** ионно-плазменные покрытия, частица, тонкие пленки, рост кристаллов, сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, вихревое поле.

**Keywords:** ion-plasma coatings, particle, thin solid film, crystal growth, super-low friction, superconductivity, superfluidity, flows without energy dissipation, vortex field.

### Введение

В целях повышения износостойкости и антифрикционных свойств деталей машин и устройств применяют защитные покрытия, наносимые, например, вакуумными ионно-плазменными методами.

Современные требования к физико-механическим свойствам рабочих узлов и деталей механизмов и машин определены соответствующим развитием отраслей промышленности.

Весьма перспективна разработка технологий нанесения покрытий вакуумными ионно-плазменными методами и установление взаимосвязи процессов роста покрытий с формированием заданных свойств, так как свойства веществ во многом определяются кристаллической структурой, которая формируется в процессе его получения.

\* По материалам доклада на конференции "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении—2019".

Формирование анизотропных слоев вещества с вихревыми потоками веществ, движущихся без диссипации энергии, возможны при выращивании кристаллов в виде слоев в специальных устройствах с заданными параметрами. Вещества с анизотропной структурой обладают рядом необычных свойств и находят применение для получения сверхпроводимости и сверхнизкого трения [1—5].

**Цель работы** — создание вихревой модели роста кристаллических структур как диссипативной системы конденсированной среды с квантовыми потоками частиц, формирующихся в виде круговых потоков с двумя перпендикулярными осями кристаллизации. Такие покрытия дают возможность создания конденсированной среды с квантовыми потоками частиц, движущимися без рассеяния энергии в отсутствие сил взаимодействия по эквипотенциальным поверхностям тела в виде сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести.

## Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Проведены триботехнические испытания на воздухе при нормальных условиях на машинах трения УГС-1 по схеме диск—сфера (диаметр сферы 9,0 мм) при удельной нагрузке  $10^5$  Н/см<sup>2</sup>, скорость скольжения постоянна — 0,019 м/с, покрытий на основе переходных металлов IV–VI групп Периодической системы — оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия, дихалькогенидов молибдена и вольфрама (MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> и WSe<sub>2</sub>), нанесенных вакуумными ионно-плазменными методами (рис. 1). Проведение триботехнических исследований на воздухе создает более интенсивные условия эксплуатации, так как высокие антифрикционные свойства и большая долговечность дихалькогенидов проявляются в вакууме и инертных средах. Покрытия наносили при температуре подложки от 283 до 1573 К на полированные образцы компактной керамики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Структура покрытий исследована методом дифракции электронов на отражение в электронографе ЭМР-102М, морфологию поверхности изучали с помощью электронных микроскопов JXA-841 и JSM-35С. Элементный состав полученных покрытий исследовали методами спектроскопии характеристического рентгеновского излучения (JEM-100С с приставкой CEVEX) и рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии (ESCALAB-5) [4–12].

При нанесении покрытий вакуумными ионно-плазменными методами поток распыленного вещества распределяется по закону Ламберта (косинуса) (см. рис. 1) [1]. Один из основных параметров, влияющих на структуру и свойства таких покрытий, — температура. Поэтому исследовали влияние температуры подложки в процессе нанесения покрытий, а также фор-

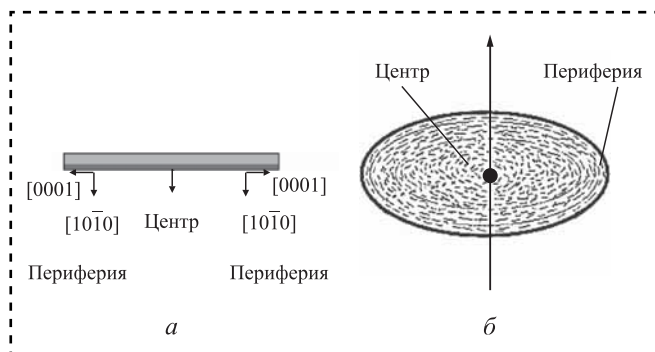


Рис. 1. Схема нанесения (а) и вид поверхности покрытия сбоку под углом (б)

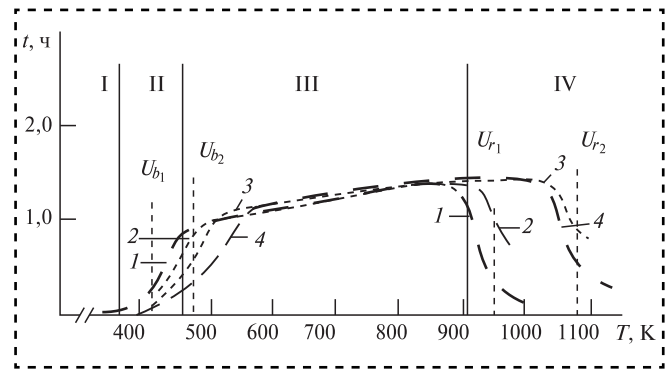


Рис. 2. Зависимость долговечности покрытий на основе дихалькогенидов на образцах из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от температуры подложки при триботехнических испытаниях по схеме диск—сфера:

1 — MoS<sub>2</sub>; 2 — MoSe<sub>2</sub>; 3 — WS<sub>2</sub>; 4 — WSe<sub>2</sub>; I — аморфная структура; II — поликристалл; III — текстура; IV — область разложения дихалькогенида MX<sub>2</sub> на металл и халькоген;  $U_{b1,2}$  — потенциальный барьер поверхности MoS<sub>2</sub> и WSe<sub>2</sub>;  $U_{r1,2}$  — энергии разложения дихалькогенидов MoS<sub>2</sub> и WSe<sub>2</sub>

мирование структуры при размещении образцов в центре и на периферии платы держателя подложек на кристаллическую структуру и триботехнические свойства.

Установлено, что при изменении температуры подложки формируются покрытия со структурой гексагонального 2H-MoS<sub>2</sub> с ориентациями кристаллитов с осями  $[10\bar{1}0]$ , перпендикулярными поверхности подложки (для MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>) в температурном диапазоне 473...973 К и  $[1\bar{1}20]$  для MoS<sub>2</sub> при температуре 673...773 К. Наименее низкую температуру кристаллизации наблюдали для покрытий из MoS<sub>2</sub>, наиболее высокую — для WSe<sub>2</sub> (рис. 2). Вблизи центра платы текстуры роста с осью  $[10\bar{1}0]$  наблюдали у всех дихалькогенидов, тогда как текстура с  $[1\bar{1}20]$  обнаружена у покрытий из MoS<sub>2</sub> в температурном диапазоне 673...773 К (рис. 3). При этом ось  $[0001]$  была полностью разориентирована в плоскости, параллельной поверхности подложки. Совпадение направления пучка электронов в колонне электронографа с радиус-вектором из центра платы приводит к возникновению симметричной дифракционной картины, причем при параллельном перемещении образца под пучком вид картины остается неизменным. При удалении на периферию происходило возникновение второй текстуры с ориентацией оси  $[0001]$  параллельно поверхности с сохранением одновременно ориентации оси  $[10\bar{1}0]$  перпендикулярно к поверхности подложки [4–12].

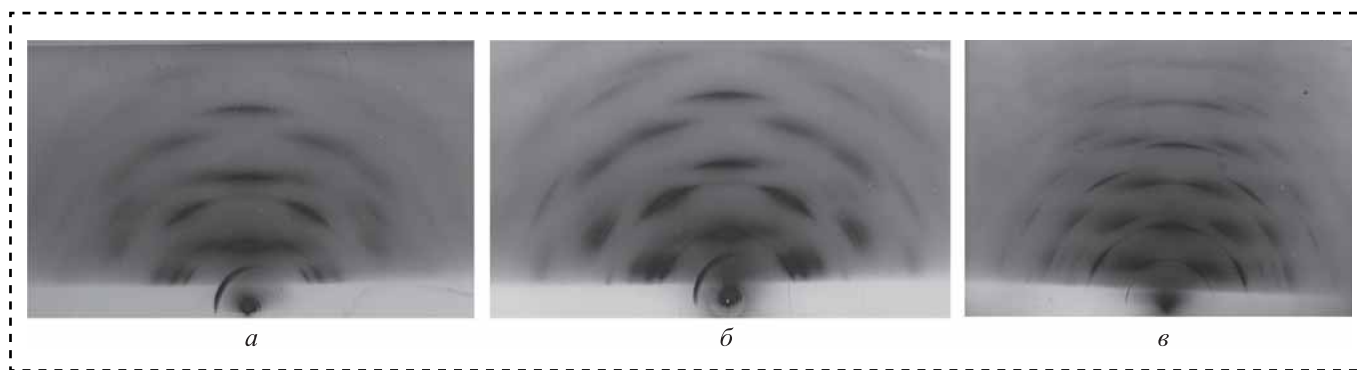


Рис. 3. Электронограммы покрытий  $\text{MoSe}_2$  (а, б) и  $\text{MoS}_2$  (в) толщиной 0,5 мкм, нанесенных при температуре 553 К ( $\text{MoSe}_2$ ), 723 К ( $\text{MoS}_2$ ) при расположении образцов в центре платы (а, в) и на ее периферии (б)

Кристаллиты ориентируются практически правильно с небольшим угловым разбросом, что обеспечивает формирование дифракционной картины типа текстуры (см. рис. 3). При этом кристаллиты при удалении от центра платы образуют замкнутые концентрические окружности. Такая закономерность роста сохраняется при нанесении покрытий других дихалькогенидов молибдена и вольфрама (например,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ).

Фазовый переход от аморфной структуры к кристаллической является нелинейным, т.е. происходит в диапазоне температур [4–12]. Область кристаллизации для  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{WSe}_2$  по сравнению с дисульфидом молибдена  $\text{MoS}_2$  смещена в зону более высоких температур. Наиболее высокие температуры перехода от аморфной структуры к текстурированной кристаллической наблюдали для диселенида вольфрама  $\text{WSe}_2$ , что сопровождалось соответствующим смещением области более высоких триботехнических характеристик в зону более высоких температур. Это может быть связано со смещением потенциального барьера поверхностной энергии  $U_b$  в область более высоких температур для более тугоплавких соединений. Также такое смещение приводит к увеличению области кристаллизации: наименьшая ширина области кристаллизации у  $\text{MoS}_2$  (473...523 К), наибольшая — у  $\text{WSe}_2$  (493...563 К) [6–14]. При расположении образца в центре платы держателя кристаллиты росли в виде текстуры с осями  $[10\bar{1}0]$  и  $[11\bar{2}0]$  при соответствующих температурах подложки. Ось  $[0001]$  полностью разориентирована в плоскости, параллельной поверхности подложки. По мере удаления от центра платы на периферию при сохранении текстуры  $[100]$  наблюдали возникновение второй

оси текстуры  $[0001]$  с ориентацией по радиусам из центра платы. Для  $\text{MoS}_2$  при температуре подложки 673...773 К наблюдали возникновение текстуры  $[11\bar{2}0]$  вместо  $[10\bar{1}0]$  при сохранении одновременной ориентации второй оси текстуры  $[0001]$  по радиусам из центра платы. При удалении от центра платы кристаллиты образуют замкнутые концентрические окружности вокруг центра платы в виде вихревых структур.

Текстуры с осями  $[100]$  и  $[11\bar{2}0]$  в покрытиях на основе дихалькогенидов — текстуры роста, так как они возникают не на стадии зарождения, а на более поздних стадиях. Так, например, в случае нанесения дисульфида молибдена на полированные образцы из стали или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при температуре 523 К покрытие неоднородно по толщине. Покрытия толщиной менее 0,08 мкм обладают аморфной структурой и имеют ровную поверхность. При фрикционных испытаниях такие покрытия не проявляли антифрикционного действия, как и в случае нанесения покрытий при низких температурах подложки. Покрытия, полученные толщиной более 0,1 мкм при указанных условиях, имели хорошие антифрикционные свойства [4–12].

Поверхность растущего покрытия имеет характерный вид дендритной структуры с гребнеобразной формой (рис. 4). В результате конкурентного отбора в процессе нанесения покрытия преимущественный рост получают кристаллографические плоскости с индексами  $(10\bar{1}0)$ , имеющие наиболее высокую поверхностную энергию. При этом атомно-гладкие плоскости  $(0001)$  растущих кристаллов, где действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса, обеспечивают непрерывный приток мигрирующих атомов в область кристаллизации, что обеспечивает рост кристаллитов в виде пластинок.

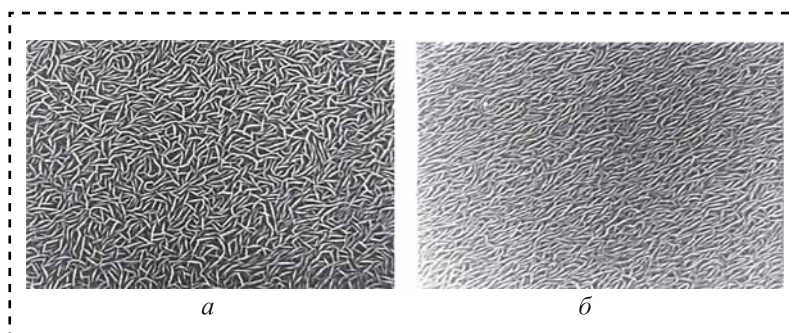


Рис. 4. Поверхности покрытий  $\text{MoSe}_2$ , нанесенных при температуре 553 К толщиной 0,5 мкм при расположении образцов в центре платы (а) и на периферии (б)

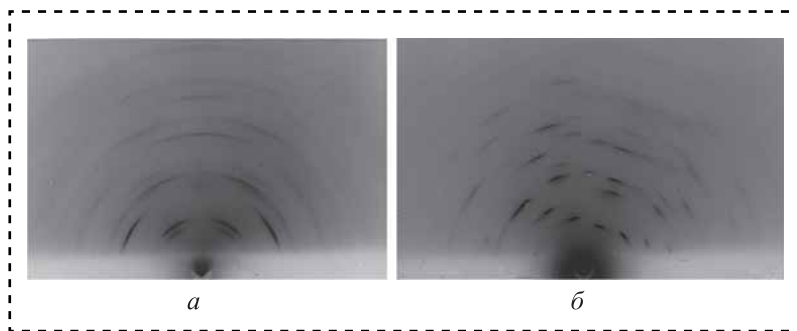


Рис. 5. Электронограммы покрытий  $\text{AlN}$  (а, б) толщиной 2,5 мкм при расположении образцов в центре платы (а) и на ее периферии (б)

Рост температуры подложки выше температуры нелинейного фазового перехода от аморфной структуры к кристаллической приводит к дальнейшему практически линейному росту размера кристаллов в покрытиях при сохранении дендритного строения поверхности для покрытий всех дихалькогенидов. При фрикционных испытаниях дихалькогенидные покрытия с аморфной структурой не проявляли антифрикционного действия, в то время как покрытия с кристаллической структурой имели достаточно высокие триботехнические характеристики. Подобные свойства наблюдали у покрытий из всех исследованных дихалькогенидов. Антифрикционные свойства кристаллических покрытий с ростом размера кристаллитов повышались пропорционально размеру кристаллов. В этих экспериментах изменяли только температуру подложки.

Дальнейшее улучшение триботехнических свойств покрытий возможно посредством изменения технологии нанесения и создания легированных многослойных покрытий с износостойким подслоем [4–12]. Например, увеличение твердости подложки приводит к снижению коэффициента трения и росту долговечности по-

крытий на основе дихалькогенидов, что объясняется легкостью раскалывания кристаллитов и формированием преимущественной ориентации оси  $[0001]$ , перпендикулярно поверхности в процессе трения, обеспечивающей легкость скольжения пакетов X-M-X (X — халькоген, М — металл) дихалькогенида друг относительно друга. Также триботехнические и физико-механические характеристики улучшаются при легировании дисульфида молибдена [4–22].

Исследован механизм роста износостойких покрытий, используемых в качестве твердого износостойкого подслоя (оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия). Аналогичный механизм роста кристаллитов наблюдали при нанесении покрытий из нитрида алюминия  $\text{AlN}$  (имеющего гексагональную кристаллическую структуру с решеткой вюртцита) методом магнетронного распыления (рис. 5). По мере удаления от центра формируются покрытия с осью  $[10\bar{1}0]$  при наличии одновременной ориентации второй оси текстуры  $[0001]$  по радиусам из центра платы. Вторая ось  $[0001]$  кристаллитов наклонялась в сторону центра платы вплоть до угла  $15^\circ$  к поверхности подложки при соответствующем наклоне основной оси текстуры  $[100]$  соответственно в сторону центра.

При нанесении вакуумными ионно-плазменными методами и методом электронно-лучевого испарения (РЭП) покрытий из чистого молибдена и хрома, а также их соединений типа нитридов и оксидов с кубической объемно-центрированной кристаллической решеткой, в центре платы на образцах формировалось покрытие с осью текстуры  $[110]$ . По мере удаления на периферию происходил постепенный наклон оси текстуры  $[110]$  в сторону центра (вплоть до перехода в текстуру с осью  $[111]$ ) при одновременной ориентации оси  $[100]$  по радиусам из центра платы. В этом случае также сохранялся подобный механизм роста кристаллов.

Покрытия  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  имели тригональную структуру, пространственная группа  $D_{3d}^6 - R\bar{3}c$ . Рост кристаллов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  подчинялся той же закономерности — в центре платы формируется текстура с осью  $[100]$ , перпендикулярной поверхности подложки. При удалении к периферии

наблюдали плавный наклон оси [100] к центру с одновременной ориентацией оси [0001] по радиус-вектору, выходящему из центра держателя образцов. Но двумерной вытянутости кристаллов не просматривалось, как в случае дихалькогенидов переходных металлов, что связано с отсутствием столь значительной анизотропии поверхностной энергии соответствующих кристаллографических граней.

Полученные результаты свидетельствуют о возникновении подобия на разных шкалах измерения покрытий на основе дихалькогенидов молибдена и вольфрама ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$  и  $\text{WSe}_2$ ), а также подобие покрытий на основе оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия, наносимых ионным распылением в вакууме. Подобие структуры покрытий заключается в формировании текстур с двумя осями.

Легированные покрытия из дисульфида молибдена состава  $\text{MoS}_2\text{D}_x$  по внешнему виду практически не отличаются от обычных покрытий  $\text{MoS}_2$ . В качестве легирующего вещества D могут быть выбраны элементы или соединения, не образующие сильных (химических) связей с основной решеткой  $\text{MoS}_2$ . При фрикционных испытаниях по схеме диск—сфера покрытий с кристаллической структурой гексагонального дисульфида молибдена  $2\text{H—MoS}_2$  получены достаточно низкие значения коэффициента трения, но в целом соответствующие трению природного дисульфида молибдена. Однако фрикционные испытания в тех же условиях покрытий состава  $\text{MoS}_2\text{D}_x$  привели к получению необычно низких значений коэффициента трения (эффекта сверхнизкого трения) (рис. 6).

Электроннографические исследования покрытий  $\text{MoS}_2\text{D}_x$  показали, что в них произошло значительное увеличение периода решетки

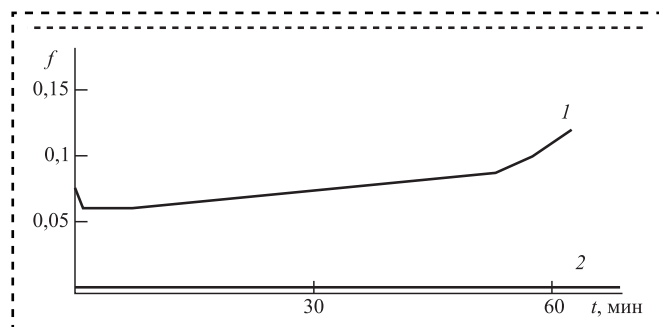


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от длительности испытаний легированных покрытий на основе дисульфида молибдена:  
1 —  $\text{MoS}_2$ ; 2 —  $\text{MoS}_2\text{D}_x$

вдоль оси  $c$  (до  $1,38...1,43$  нм) против  $1,2295$  нм для соединений со стехиометрическим составом (гексагональный  $2\text{H—MoS}_2$ ) при практически неизменном периоде вдоль оси  $a$ . Увеличение расстояния между слоями при размещении атомов D в межпакетных пространствах в силу того, что энергия ван-дер-ваальсова взаимодействия меняется пропорционально  $r^{-6}$ , должно приводить к уменьшению этого взаимодействия практически на порядок. В соответствующих условиях возможна реализация движения таких атомов без диссипации энергии в виде эффекта сверхнизкого трения. Нанесение легированных многослойных покрытий приводит к возможности сверхнизкого трения при нормальных условиях на воздухе и сопровождается возрастанием долговечности покрытия в несколько раз.

Установлено, что наиболее высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия из дихалькогенидов с кристаллической структурой, покрытия с аморфной структурой практически неработоспособны. Легирование кристаллических покрытий приводит к получению эффекта сверхнизкого трения.

### Изменение геометрии частиц при движении

При переходе от какого-либо события в одной инерциальной системы отсчета, характеризующегося четырьмя пространственно-временными координатами, к другой инерциальной системе отсчета необходимы преобразования координат и времени при таком переходе (а именно, преобразования Лоренца).

Рассмотрим преобразования Лоренца для пространственных координат и времени электрического и магнитного полей в разных системах отсчета (рис. 7) [4—12]. Движение инерциальной системы отсчета только условно прямолинейное и равномерное [13—15, 21—28]:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \\ y &= y'; \\ z &= z'; \\ t &= \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;  
 $v$  — скорость движения материального тела;  
 $\beta = v/c$ .



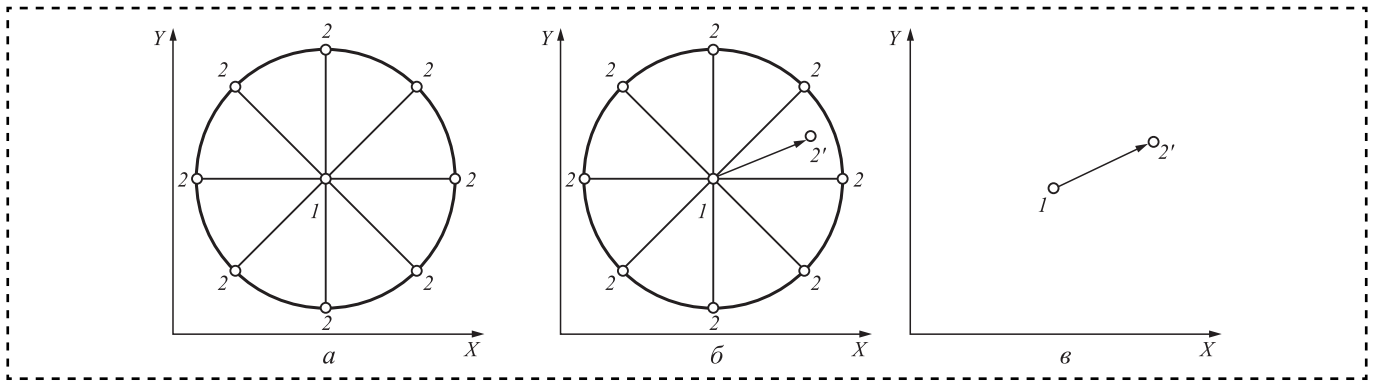


Рис. 7. Взаимодействие пробной частицы 1 с частицами 2:

*a* — в их симметричном поле; *b* — с нарушенным равновесием; *в* — двух частиц в среде

Формулы, выражающие  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ,  $t'$  через  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$ , получаются из соотношения (1) заменой  $v$  на  $-v$ . При движении материального тела со скоростью  $v$  и использовании преобразований Лоренца происходит сжатие длины:

$$l' = l_0(1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (2)$$

и замедление времени

$$t' = t_0/(1 - v^2/c^2)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $c_0$  — скорость света в вакууме.

Штрихом отмечены координаты и время движущейся со скоростью  $v$  системы. При переходе из одной системы отсчета в другую (движущуюся относительно первой) со скоростью  $v$  проекции векторов электромагнитного поля  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  также связаны между собой преобразованиями Лоренца:

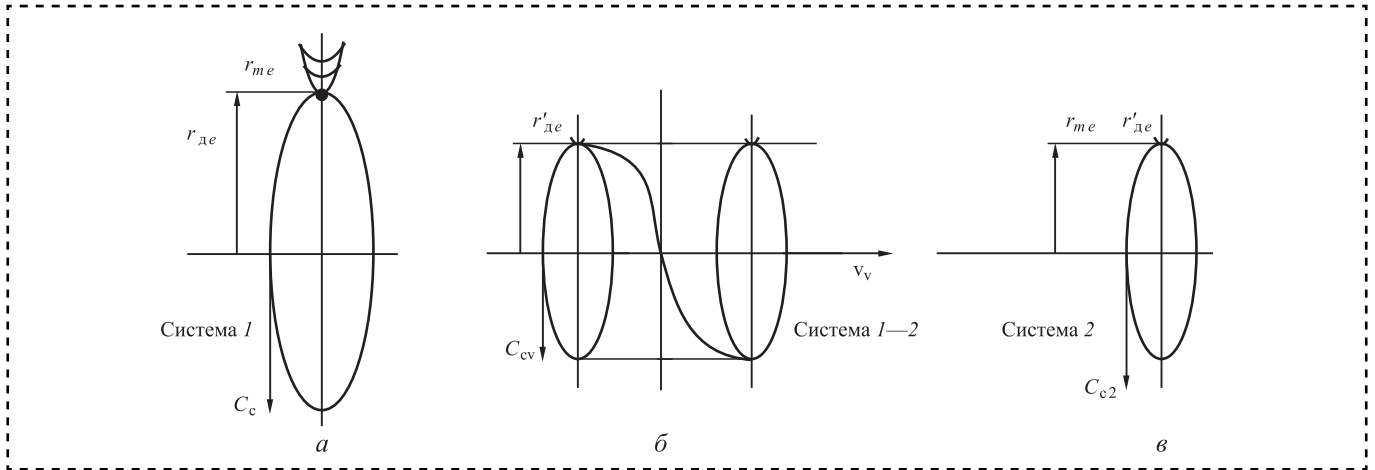
$$\vec{E} = \frac{1}{c} \frac{[\mathbf{v} \times \mathbf{H}]}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (4)$$

Однако представления Лоренца об электронном строении вещества основаны на предположении о существовании эфира. Согласно этим представлениям при движении материального тела происходит его сжатие вдоль направления перемещения пропорционально скорости перемещения. В ходе дальнейших исследований не было подтверждено влияние эфира на изменение геометрии тел. Закон сохранения энергии утверждает, что энергия тела никогда не исчезает и не появляется вновь, она может лишь превращаться из одного вида в другой. Получение энергии из вакуума не представляется возможным, энергию вакуума не удастся вычислить как собственное значение для гамильтониана ваку-

умного состояния, т.е. как источника энергии. Следовательно, возникает несоответствие закону сохранения энергии [13—15, 22—25].

Поэтому изменение размеров тела в процессе движения принято в виде постулата. Кроме того, наличие статического электрического поля при кулоновском взаимодействии не объясняет причину возникновения движения пробной заряженной частицы по закону Кулона. В реальных физических системах энергетически выгодным является движение не прямолинейное и равномерное, это движение без рассеяния энергии по имеющим кривизну эквипотенциальным поверхностям. Движение с ускорением происходит вдоль радиуса потенциального векторного поля до фазового перехода частицы в новое состояние с последующим излучением соответствующего кванта энергии с формированием равновесия. Эти представления можно применить к электрону с учетом квантово-механических свойств электрона.

Спин электрона  $S$  равен  $h/2$  и является критерием подобия как отношение де Бройля  $r_{де}$  и Томсона  $r_{ме}$  ( $r_{ме}$  — классический радиус электрона, радиус Лоренца или длина томсоновского рассеяния;  $r_{де}$  — комптоновский радиус электрона). Скорость света  $c_0$  также является критерием подобия отношения де Бройля к времени колебания электрона  $t_{де}$  и зависит от плотности среды  $\rho_c$ . Рассмотрим электрон как волчок со спином  $S$  и смещенным центром тяжести (рис. 8) [10—12]. Наблюдается реальное смещение центра масс электрона на расстояние  $r_{де}$  и превращение его в конструкцию волчка с соответствующими особенностями [4—12]. Такой электрон обладает как волновыми, так и корпускулярными (квантовыми) свойствами. Масса электрона  $m_e$  может быть переменной


**Рис. 8. Волна вероятности де Бройля:**

*a* — электрон, покоящийся в системе 1 при  $v = 0$ , плотности  $\rho_1$ ; *б* — электрон движущийся: переход от системы 1 к системе 2 при скорости  $v_1$ , плотности среды  $\rho_{1,2}$ ; *в* — электрон, покоящийся в системе 2 при  $v = 0$ , плотности среды  $\rho_2$

в зависимости от его скорости. Спин частицы — квантовая характеристика:

$$h = m_e c_0 \lambda_{де}, \quad (5)$$

где  $c_0$  — измеренная скорость света;

$\lambda_{де}$  — комптоновская длина волны вероятности;

$r_{ме}$  — радиус кривизны, определяющий массу,

$$r_{ме} = \mu_0 q^2 / 4\pi m_e, \quad (6)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;

$q$  — элементарный заряд.

При этом радиус массы  $r_{ме}$  определяет массу и энергию электрона [34, 35]. Масса электрона определяется кривизной  $1/r_{ме}$  и константой  $\mu_0 q^2 / 4\pi$  [26, 27]:

$$m_e = r_{ме} \mu_0 q^2 / 4\pi. \quad (7)$$

Скорость света  $c_c$  в инерциальных системах отсчета, движущихся с различными скоростями  $v_c$ ; постоянна. В то же время в сильных гравитационных полях  $c_c$  будет замедляться пропорционально плотности среды  $\rho_c$  и  $\beta$ .

Среда является суммой суперпозиций полей элементарных частиц и определяет в свою очередь их свойства и геометрию. Соотношение  $\lambda'_{де} / r'_{ме} = 2\pi\alpha$  остается постоянным, при этом  $r'_{ме}$  изменяется согласно преобразованиям Лоренца, при этом  $\lambda_{де}$  (длина волны  $\lambda_{де}$  без штриха направлена под  $90^\circ$  к направлению движения) остается постоянной и зависит от плотности среды  $\rho_c$ .

Постоянная тонкой структуры  $\alpha$  — критерий подобия системы частиц [20—28]:

$$\alpha = r_{ме} / r_{де} = q^2 / 2\varepsilon_0 h c_0 = q^2 \mu_0 c / 2h, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  — электрическая и магнитная постоянная.

Рассмотрим свойства среды как суперпозицию полей частиц. Плотность среды  $\rho_c$  характеризуется массой  $m_c$ , находящейся в единице объема  $V_n$ :

$$\rho_c = m_c / V_n, \quad (9)$$

и определяет обратную величину скорости вихревого поля  $C_c$ , как скорость движения суммы полей частиц  $C_{ci}$  в точке пространства:

$$1/C_c = \sum 1/C_{ci}. \quad (10)$$

Математически скорость света  $c_c$  является пределом суммы ряда обратных величин скорости вихревых полей всех частиц в данной точке пространства, которая и определяет скорость света в векторной точке как скорость движения суммы полей:

$$1/c_{c0} = \sum_{i=1}^n 1/c_{ci}. \quad (11)$$

Параметры неподвижного электрона  $r_{ме}$ ,  $r_{де}$ ,  $h$  определяют плотностью среды  $\rho_n$ , в которой частица (электрон) находится. При нарушении симметрии среды возникает движение частицы под влия-



нием поперечного потока среды [10—12, 21—24]. Поперечный поток вызывает продольное спиральное вихревое движение электрона. Изменение геометрии поперек направления движения (вдоль осей  $YZ$  и возникновение спирали) позволяет получить новые варианты движения частиц, отличные от прямолинейного и равномерного движения.

Применим эти преобразования для получения вихревого движения [4—12]. Учтем влияние среды как полной энергии находящейся в ней частицы, состоящей из суммы потенциальной  $U_p$  и кинетической энергии  $E_k$  [13—37]:

$$W_s = U_p + E_k. \quad (12)$$

Рассмотрим изменение квадрата импульса при движении частицы. Сжатие частицы при росте скорости  $v$  происходит по оси  $X$  вдоль направления движения согласно преобразованию Лоренца:

$$m_{e1}^2 C_c^2 = m_{e0}^2 C_c^2 + m_{ev1}^2 v^2. \quad (13)$$

Взаимодействие двух частиц с последующим движением под действием электрического поля осуществляется по правилу треугольника в векторной форме:

$$C_c = C_v + v_v, \quad (14)$$

где  $C_c$  — синусоидальная скорость света,  $C_c = 4\pi c_0$ ;

$c_0$  — измеренная скорость света [34, 35];

$C_v$  — скорость движения по радиусу  $r_{dev}$ ;

$v_v$  — скорость движения частицы.

Тогда в скалярном виде разложение скорости  $C_c$  равно  $C_c^2 = C_v^2 + v_v^2$ . Скорость света в постоянной по плотности  $\rho_c$  среде постоянна и зависит от изменения плотности  $\rho_{ci}$ . Однако если принять переменной скорость света в среде (которая не превышает синусоидальную скорость света  $C_c$  как некоторого предела), тогда сжатие частицы при росте скорости движения  $v$  происходит по спирали в виде вихря вдоль осей  $Y$  и  $Z$  подобно преобразованию Лоренца:

$$m_{ev1}^2 C_v^2 = m_{e0}^2 C_c^2 + m_{ev}^2 v_c^2, \quad (15)$$

где  $m_{e0}$  — масса покоящегося электрона;

$m_{ev}$  — масса движущегося электрона.

Замедление времени также сохраняется как преобразования Лоренца:

$$t' = t_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}. \quad (16)$$

Необходимо различать время вихревого (кругового)  $t_b$  и прямолинейного  $t_{п}$  движений, в сумме дающих время  $t_0$ , являющегося постоянным для данной плотности среды  $\rho_c$ . Время  $t_0$  определим по правилу треугольника

$$t_0^2 = t_b^2 + t_{п}^2. \quad (17)$$

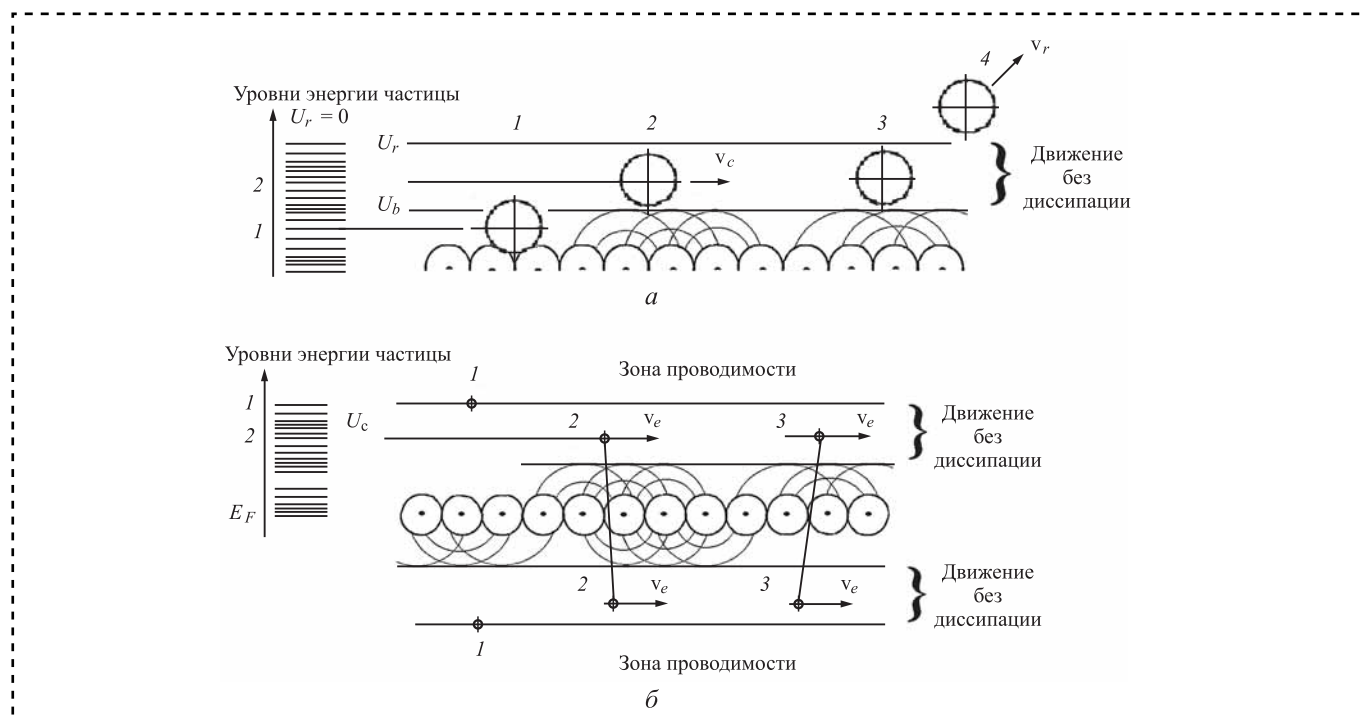
Замедление времени связано с ростом плотности потенциального поля, в котором находится пробная частица. Движение в силовых потенциальных полях (электрическом или гравитационном) поперек силовых линий прямолинейно и ускоренно. При увеличении скорости движения до критической, определяемой фазовым переходом при критической величине характерного параметра, происходит преодоление потенциального барьера. После излучения фотонов (энергии, равной потенциальному барьеру) фотон и электроны в атоме движутся по атомным орбиталам с постоянной скоростью.

Тем самым траектория движения частицы с ростом скорости  $v_c$  превращается в спираль соленоидальной структуры.

Движение без рассеяния энергии осуществимо по эквипотенциальным поверхностям среды.

В реальном окружающем мире вообще отсутствует строго прямолинейное движение. Реальные физические процессы — электрический ток, процесс трения, движение жидкостей, рост кристаллов — являются неравновесными диссипативными процессами, потоками энергии и вещества вдали от равновесия [16, 17]. Подавляющее большинство встречающихся в природе систем и процессов находятся вдали от термодинамического равновесия. Однако в таких неравновесных процессах возможно возникновение стационарных потоков вещества, движущихся без диссипации.

*Диссипативная система* (или диссипативная структура) — открытая система, которая оперирует вдали от термодинамического равновесия, устойчивое состояние, возникающее в неравновесной среде при условии рассеивания энергии, которая поступает извне. Диссипативная система иногда называется стационарной открытой системой или неравновесной открытой системой, характеризуется спонтанным появле-



**Рис. 9.** Перемещение частиц вещества без диссипации энергии по эквипотенциальным поверхностям выше критического уровня энергии (в момент перескока из положения 1 в положение 3 атом находится в состоянии движения без рассеяния энергии):

*а* — атома при повышении тепловой энергии (молекулы по сингулярной плоскости (0001) дихалькогенида); *б* — электрона куперовской пары с уровня Ферми в нижний уровень зоны проводимости при охлаждении (в случае образования куперовской пары электрон находится в состоянии сверхпроводимости)

нием сложной, зачастую хаотичной структуры. В таких системах возникают вихревые структуры, которые в устойчивом состоянии широко распространены в природе — рост кристаллов, раковины, атмосферные вихри, вихри воды.

Движение без диссипации энергии осуществляется по эквипотенциальным поверхностям вдоль вихревого векторного поля. Движение происходит поперек силовых линий потенциального векторного поля. В электроде при определенной плотности среды существует несколько кривых поля (положительной и отрицательной кривизны), взаимосвязанных с постоянными строения частицы (рис. 9). Существует ряд возрастающих по величине взаимодействий от близкодействующих сильного ядерного и электромагнитного до межмолекулярного вандер-ваальсового. Близкодействие определяется расстояниями взаимодействия, соизмеримыми с размерами частиц, дальнедействующее гравитационное взаимодействие характеризуется существенно большими расстояниями. Энергия электромагнитного взаимодействия больше в сравнении с гравитационным взаимодействием в  $4,17 \cdot 10^{42}$  раз [29—31].

### Образование Вселенной как диссипативной системы парных и спутанных частиц

Согласно современным представлениям, окружающий нас мир образовался в результате фазового перехода типа Большого взрыва из сингулярного состояния в современное состояние материи [13—19]. Движение частиц вселенной после фазового перехода приняло вихревой вид (галактические системы, планетарные системы, вихревые потоки частиц газа и т.д.) [18]. Образование вихревых структур является следствием фазового перехода с преодолением критической величины потенциального барьера. При фазовом переходе произошло возникновение явления квантовой запутанности частиц подобных спаренным электронам в атомах и молекулах.

В электронной технике возникло понятие тактовой частоты для синхронизации различных процессов в неравновесных колебательных системах. Системы, объединенные средой, имеют одинаковую угловую частоту колебаний (вращений) электрона  $\omega_{де} = 2\pi/t_{де} = 4,878250 \cdot 10^{-21}$  с



при времени  $t_{де} = r_{де}/c_0 = 0,4043913 \cdot 10^{-20}$  с. Тем самым возникает абсолютная частота колебаний электрона и других частиц (абсолютное ньютоновское время). Тогда любая частица имеет постоянную частоту колебаний независимо от скорости движения.

Для классического предсказания будущего пробной частицы через некоторое время необходимо учесть влияние и взаимодействия всех частиц ( $10^{85}$ ) и их вероятностное распределение по Вселенной — чем дальше от пробной частицы, тем слабее потенциальные поля окружающих частиц и взаимодействия, поэтому необходима формула для учета суперпозиции всех частиц системы:

$$1/r_{me} = \sum_{i=1}^n 1/r_{mi}. \quad (18)$$

Квантовая нелокальность, или квантовая запутанность, — это квантово-механическое явление, при котором квантовые состояния двух или большего числа объектов оказываются взаимозависимыми (например, можно получить пару частиц (например, фотонов), находящихся в запутанном состоянии, и тогда если при измерении спина первой частицы спиральность оказывается положительной, то спиральность второй всегда оказывается отрицательной, и наоборот). Такая взаимозависимость сохраняется, даже если эти объекты разнесены в пространстве за пределы любых известных взаимодействий. Измерение параметра одной частицы приводит к мгновенному (в смысле выше скорости света) прекращению запутанного состояния другой, что находится в логическом противоречии с принципом локальности (при этом теория относительности не нарушается и информация не передается). Поэтому существование и воздействие среды как суперпозиции полей всех частиц можно рассматривать как скрытые параметры.

Наличие дальнего действия и близкого действия обеспечивает возможность взаимосвязи всех частиц с полями Вселенной как единой диссипативной системы в течение достаточно малого промежутка времени. В основе явлений подобия лежит вихревая природа частиц, из которых формируются Периодическая система элементов. Частоту флуктуационных микроколебаний такой системы достаточно сложно экспериментально измерить макроприборами.

## Заключение

Экспериментально обнаружен нелинейный фазовый переход в диапазоне температур от аморфной структуры к кристаллической при нанесении ионно-плазменных покрытий.

Предложена атомно-кластерная модель роста покрытий в вакууме, в основе которой лежит воздействие тепловых потоков — частиц осаждаемого вещества и потока тепла от нагревателя с формированием перекрестного потока мигрирующих частиц, движущегося без диссипации по эквипотенциальным поверхностям растущего покрытия. Исследовано явление вихревого переноса частиц без диссипации энергии вдоль эквипотенциальных поверхностей, имеющее квантово-механическую природу. Образование вихревых структур является следствием фазового перехода, определяемого плотностью среды.

Постоянная тонкой структуры и скорость света  $c_0$  являются критерием подобия строения частиц и зависят от локальной плотности среды  $\rho_n$ .

Скорость и энергия движения частицы в среде зависят от величины нарушения равновесия перекрестного поля.

## Библиографический список

1. Булаевский Л.Н. Сверхпроводимость и электронные свойства слоистых соединений // УФН, 1975. Т. 116. С. 449.
2. Babaev E., Speight M. Semi-Meissner state and neither type-I nor type-II superconductivity in multicomponent superconductors // Phys. Rev. 2005. Vol. 72. P. 180502(R).
3. Moshchalkov V., Menghini M., Nishio T. Type-1.5 Superconductivity // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102. P. 117001.
4. Ноженков М.В. Потoki подобных частиц без диссипации энергии // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 5. С. 38—48.
5. Ноженков М.В. Влияние структуры на сверхнизкое трение покрытий, нанесенных ионным распылением // Поверхность. 2015. № 5. С. 100—112.
6. Ноженков М.В. Квантовые потоки как вихревые сверхструктуры // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 3. С. 132—144.
7. Ноженков М.В. Структура и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий // Поверхность. 2014. № 1. С. 54—63.
8. Nozhenkov M.V. The ultra-low friction of layer structures // Mechanical Engineering Research. 2013. Vol. 3. No 2. P. 73—90.
9. Nozhenkov M.V. Superlow interaction in layered structures // Global Journal of Researches In Engineering. 2014. Vol. 14-A. Issue 2. P. 55—61.
10. Ноженков М.В. Вихревые потоки в диссипативных системах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 2. С. 77—91.

11. **Сосов Е.Н.** Геометрия Лобачевского и ее применение в специальной теории относительности. Казань: КФУ, 2016. 84 с.
12. **Эйнштейн А.** Теория относительности. Ижевск: НИЦ РХД, 2000. 224 с.
13. **Дирак П.А.М.** Релятивистское волновое уравнение электрона // Успехи физических наук. 1979. Т. 129. Вып. 4. С. 681—691.
14. **Куни Ф.М., Шекин А.К., Новожилова Т.Ю.** Соотношения взаимности Онзагера в неравновесной термодинамике // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2005. Сер. 4. Вып. 3. С. 125—129.
15. **Пригожин И., Кондепуди Д.** Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. 461 с.
16. **Wollack E.J.** Cosmology: The Study of the Universe. Universe 101: Big Bang Theory. NASA. 2010.
17. **Сажин М.В.** Современная космология в популярном изложении. М.: УРСС, 2002. 240 с.
18. **Веников В.А., Веников Г.В.** Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.
19. **Савельев И.В.** Курс общей физики. Т. 2. М.: Астрель, 2008. 336 с.
20. **Орир Дж.** Физика. Т. 1, 2. М.: Мир, 1981.
21. **Фейнман Р.** Квантовая электродинамика. Новокузнецк: Новокузнецкий физико-математический институт. 1998. 216 с.
22. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1976. 440 с.
23. **Бьеркен Дж.Д., Дрелл С.Д.** Релятивистская квантовая теория. Т. 1. М.: Наука, 1978. 296 с.
24. **Каршенбойм С.Г.** Фундаментальные физические константы: роль в физике и метрологии и рекомендованные значения // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. С. 271—298.
25. **Каршенбойм С.Г.** Прогресс в уточнении фундаментальных физических констант: рекомендованные значения КОДАТА 2010 // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. С. 935—968.
26. **Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б.** Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1981. 428 с.
27. **Каплан И.Г.** Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Наука, 1982. 312 с.
28. **Бараш Ю.С.** Силы Ван-дер-Ваальса. М.: Наука, 1988. 344 с.
29. **Баргатин И.В., Гришанин Б.А., Задков В.Н.** Запутанные квантовые состояния атомных систем // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 6. С. 625.
30. **Bell J.S.** On the Einstein Podolsky—Rosen Paradox // Physica. 1964. Vol. 1. No 3. P. 195—200.
31. **Einstein A., Podolsky B., Rosen N.** Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // Phys. Rev. 1935. Lett. 47 (10). P. 777—780.
32. **Aspect A., Dalibard J., Roger G.** Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers // Phys. Rev. 1982. Lett. 49. P. 1804—1807.
33. **An experimental test of non-local realism/ Simon Gröblacher et al.** // Nature. 2007. Vol. 446. P. 871—875.
34. **Aspect A.** Quantum mechanics: To be or not to be local // Nature. Vol. 446. P. 866—867.
35. **Ноженков М.В.** Постоянная тонкой структуры и вихревой рост кристаллов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 1. С. 25—45.
36. **Ноженков М.В.** Вихревые структуры роста кристаллов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 6. С. 266—283.
37. **Ноженков М.В.** Потoki подобных частиц без диссипации энергии // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 6. С. 23—33.
38. **Ноженков М.В.** Вихревые потоки в диссипативных системах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 2. С. 77—92.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"  
продолжает подписку на журнал

## "СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

- За наличный и безналичный расчет.*
- С любого номера и на любой срок.*
- Без почтовых наценок.*

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией  
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Тел.: 8 (495) 785-60-69

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

**Ю.З. Житников**, д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева),

**Б.Ю. Житников**, д-р техн. наук (Владимирский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации),

**А.Е. Матросов**, канд. техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева)

E-mail: mae76@mail.ru

## Автоматизированная установка упругих резиновых уплотнений во внутренние канавки цилиндрических деталей

*Представлено описание кинематической схемы устройства автоматизированной установки упругих резиновых уплотнений во внутренние канавки цилиндрических деталей.*

*Определены предельные режимы работы отдельных механизмов, при которых обеспечивается надежная установка уплотнения.*

*Description of kinematic diagram of device for automated installation of elastic rubber seals into internal grooves of cylindrical parts is presented.*

*The limit modes of operation of individual mechanisms are defined, at which reliable installation of the seal is provided.*

**Ключевые слова:** заготовка, резиновое уплотнение, внутренние канавки, цилиндрическая деталь, автоматизированная установка.

**Keywords:** workpiece, rubber seal, internal grooves, cylindrical part, automated installation.

Существующие в производстве устройства механизированной и автоматизированной установки кольцевых упругих уплотнений обладают двумя существенными недостатками:

— низкой надежностью установки уплотнения, так как для уменьшения диаметра кольца его деформируют в трех точках. При этом кольцо может принимать любую конфигурацию в пространстве и в момент установки его в канавку не всегда занимает требуемое положение;

— перекручивание уплотнения вокруг оси сечения при "сбрасывании" его в канавку, что при эксплуатации приводит к разрыву уплотнения и нарушению герметичности изделия.

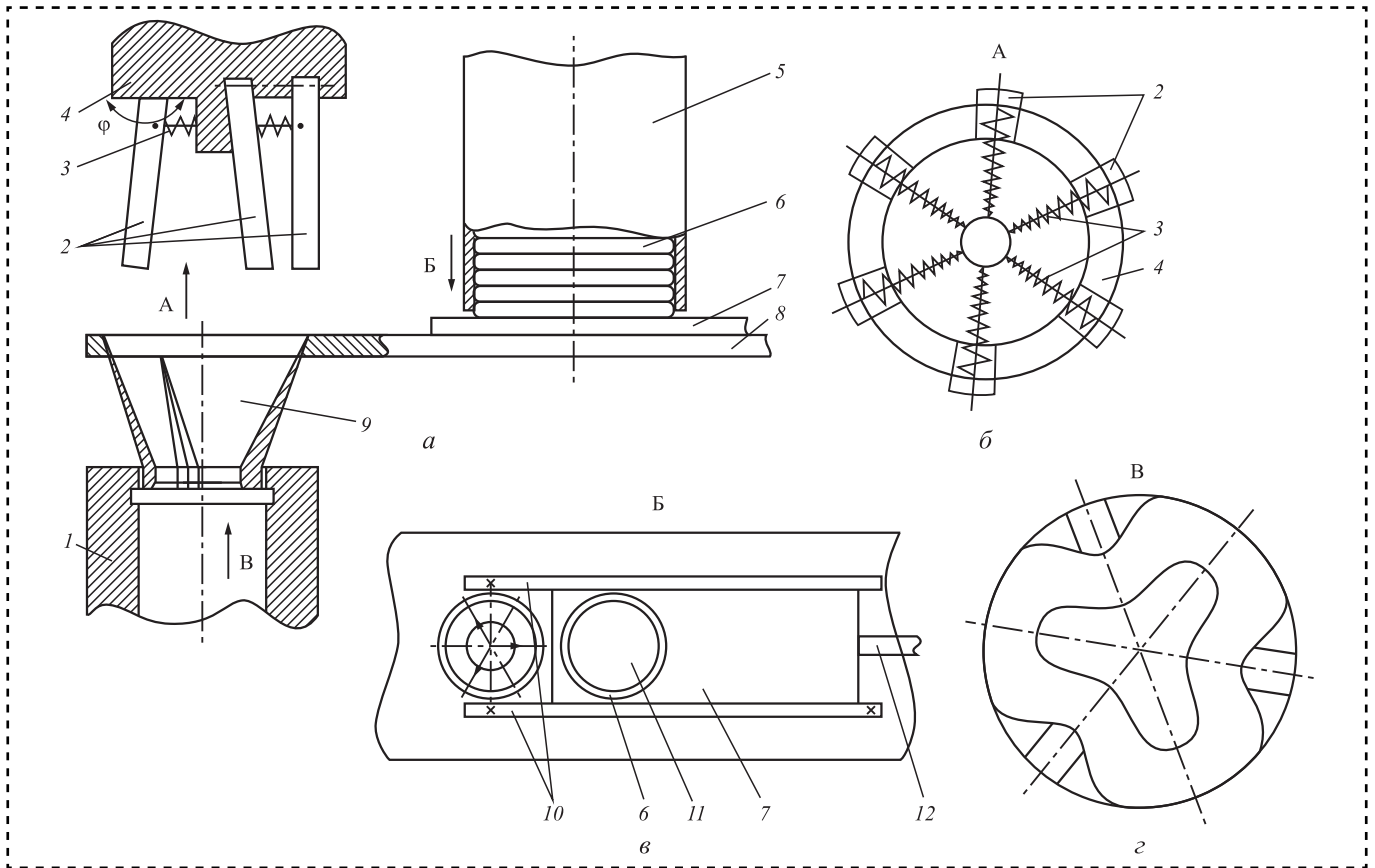
Для устранения этих недостатков предложена оригинальная схема устройства [4] (нумерация позиций на всех рисунках единая).

Устройство автоматизированной установки (рисунок) кольцевых упругих уплотнений 6 во внутренние канавки цилиндрических деталей 1 состоит из: плиты 8; механизма загрузки колец, включающего магазин 5, пневмоцилиндр (ус-

ловно не показан) со штоком 12, шибера 7 с цилиндрическим гнездом 11 под кольцевое уплотнение; втулки 9 с выступами для деформации колец в процессе его перемещения во втулке 9 к канавке детали; механизма перемещения кольца во втулке 9 с шарнирно установленными рычагами 2, поджатыми пружинами 3. На плите 8 закреплены направляющие 10 для направления шибера 7 при подаче кольцевого уплотнения на позицию установки.

Устройство работает следующим образом.

Деталь 1 с внутренней канавкой под упругое уплотнение подводится к втулке 9. Торцы втулки совмещаются с канавкой на плите 8. Шибера 7, в гнезде которого находится упругое кольцо, штоком 12 пневмоцилиндра (условно не показан) перемещается к втулке 9. Механизм подачи 4 подводится к кольцевому уплотнению, а шарнирно установленные рычаги 2, поджатые пружинами 3, перемещают уплотнение, проталкивая через втулки 9. Кольцо, взаимодействуя с выступами втулки 9, деформируется до диаметра описанной


**Устройство для автоматической установки упругого кольца во внутреннюю канавку детали:**

*a* — общий вид; *б* — вид снизу на устройство при расположении механизма подачи над устройством в позиции сборки; *в* — вид сверху на корпус с магазином; *г* — вид на деформированное упругое кольцо в момент сбрасывания его в канавку детали

окружности, меньшей, чем внутренний диаметр детали *I*. Нижний торец деформированного кольца лежит в плоскости канавки детали. При совмещении деформированного кольца *б* с канавкой оно выпрямляется, выпадая в канавку.

Механизм подачи *4* отводится в исходное положение. Одновременно деталь *I*, с установленным в канавку кольцом, отводится от втулки, шибер *7* возвращается в исходное положение, и в его гнездо из питателя *5* выпадает следующее упругое кольцо. Процесс сборки завершен.

Для исключения остаточной деформации кольца при растяжении его при перемещении к втулке *9* необходимо, чтобы сила трения кольца  $F_{тр}$  не превышала его силы упругости  $F_{уп}$ :

$$F_{тр} < F_{уп}. \quad (1)$$

Сила трения кольца:

$$F_{тр} = G_k f, \quad (2)$$

где  $G_k$  — вес кольца;

$f$  — коэффициент трения.

Сила упругости кольца определяется упругостью полукольца [3]:

$$F_{уп} = F_{из} = KBS\sigma_B, \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент изгиба;

$B$  — диаметр сечения упругого кольца;

$S$  — площадь поперечного сечения кольца,

$\sigma_B$  — предел прочности материала кольца на разрыв.

С учетом выражений (2), (3) неравенство (1) примет вид:

$$G_k f < KBS\sigma_B. \quad (4)$$

В момент торможения шибера упругое кольцо под действием силы инерции может сместиться относительно втулки, что приведет к некачественной сборке. Чтобы этого не произошло, необходимо найти предельную скорость движения шибера с кольцевым уплотнением.

Условие несмещения уплотнения будет выполняться, если сила трения уплотнения  $F_{тр}$  будет больше силы инерции  $F^{ин}$  кольца:

$$F_{тр} > F^{ин}. \quad (5)$$





Силу инерции находим из выражения [5]:

$$F^{\text{ин}} = mW_{\tau}, \quad (6)$$

где  $m$  — масса упругого уплотнения;  
 $W_{\tau}$  — тангенциальное ускорение.

Считаем, что торможение шибера происходит равнозамедленно [5]:

$$S = \frac{W_{\tau}t^2}{2}; \quad v_1 = v_0 - W_{\tau}t, \quad (7)$$

где  $S$  — путь торможения;

$t$  — время торможения;

$v_1, v_0$  — конечная скорость движения ( $v_1 = 0$ ) и начальная скорость движения шибера соответственно.

Из выражения (7) найдем тангенциальное ускорение:

$$W_{\tau} = \frac{v_0^2}{2S}. \quad (8)$$

Подставляя в неравенство (5) выражения (2), (6) с учетом формулы (8) окончательно получим предельную скорость движения шибера, при которой при остановке шибера уплотнение не сместится относительно него:

$$v_0 = \sqrt{2gSf}. \quad (9)$$

При подводе детали к втулке происходит относительное смещение их осей. Для исключения заклинивания втулки при введении ее в полость детали до расположения внутренней канавки под упругое уплотнение необходимо деталь установить на подающем устройстве с относительной податливостью в пределах 0,5...1 мм.

При высоких скоростях подвода детали к торцу втулки имеет место соударение их фасок, что может привести к деформации их поверхностей. Следовательно, могут появиться остаточные деформации на взаимодействующих поверхностях. Кроме того, втулка под действием силы удара может сместиться и нарушить взаимное положение ее в устройстве.

Для исключения упругопластического удара поверхностей детали и втулки обоснуем предельную скорость подвода детали, при которой на взаимодействующих поверхностях фасок возникали бы только упругие деформации. Так как деталь совершает поступательное движение, воспользуемся теоремой об изменении главного вектора количества движения механической системы [5].

В интегральной форме в проекции на ось, направленную по движению детали, выражение запишем:

$$mv_1 - mv_0 = \sum F_j^e \Delta t, \quad (10)$$

где  $m$  — масса детали;

$v_1, v_0$  — скорость в конце и в начале движения соответственно;

$\sum F_j^e$  — сумма внешних сил, действующих на деталь;

$\Delta t$  — время перемещения детали.

Рассмотрим удар, при котором учитывали только силу удара, а остальными силами из-за их малости можно пренебречь. Так как скорость движения детали после удара  $v_1 = 0$ , выражение (10) примет вид:

$$mv_0 = F_{\text{уд}} \Delta t, \quad (11)$$

где  $F_{\text{уд}}$  — сила удара детали о поверхность втулки;  
 $\Delta t$  — время удара.

В уравнении (11) неизвестны  $v_0, F_{\text{уд}}, \Delta t$ . Для решения уравнения воспользуемся выражением равенства работ при ударе и медленном сжатии при одинаковых деформациях взаимодействующих поверхностей [1, 6].

При ударе на взаимодействующих поверхностях возникает напряжение смятия, следовательно, выражение равенства работ можно записать:

$$A_{\text{уд}} = A_{\text{см}}. \quad (12)$$

Учитывая, что деталь совершает поступательное движение, работу при ударе запишем:

$$A_{\text{уд}} = F_{\text{уд}} h_{\text{уд}}, \quad (13)$$

где  $h_{\text{уд}}$  — деформация поверхностей взаимодействующих тел.

Считаем, что упругая деформация поверхностей происходит равнозамедленно, тогда перемещение при ударе:

$$h_{\text{уд}} = v_{\text{ср}} \Delta t = \frac{v_1 + v_0}{2} \Delta t = \frac{v_0}{2} \Delta t. \quad (14)$$

Работу от силы смятия при медленном сжатии поверхностей детали и втулки находим из выражения:

$$A_{\text{см}} = F_{\text{см}} h_{\text{см}}, \quad (15)$$

где  $F_{\text{см}}$  — сила упругого смятия поверхности;

$h_{\text{см}}$  — упругое смятие.

Сила упругого смятия [7]:

$$F_{\text{см}} = [\sigma_{\text{см}}] S_{\text{см}}, \quad (16)$$

где  $[\sigma_{\text{см}}]$  — предельное напряжение упругого смятия;

$S_{\text{см}}$  — площадь смятия.

Так как соударение поверхностей детали и втулки происходит по фаскам, то в первом приближении можно считать, что взаимодействие происходит по цилиндрическим поверхностям по средним радиусам  $R_1, R_2$ .

Площадь взаимодействия поверхностей:

$$S_{\text{см}} = 2al, \quad (17)$$

где  $a$  — полуось пятна контакта взаимодействующих поверхностей;

$l$  — длина наклонной поверхности фаски.

Полуось пятна контакта деталей, взаимодействующих по цилиндрическим поверхностям, находим из выражения [6, 8, 9]:

$$a = 1,5223 \sqrt{\frac{qR_1R_2}{E(R_1 - R_2)}}, \quad (18)$$

где  $q$  — удельная нагрузка на единицу длины взаимодействия;

$E$  — приведенный модуль упругости материалов втулки и детали.

Приведенный модуль упругости:

$$E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}, \quad (19)$$

где  $E_1, E_2$  — модуль упругости материалов детали и втулки соответственно.

Удельная нагрузка [8, 9]:

$$P = \frac{4}{3}ql, \quad (20)$$

где  $P$  — сила взаимодействия поверхностей детали и втулки при их медленном сжатии.

При снятии взаимодействующих поверхностей:

$$P = F_{\text{см}}, \quad (21)$$

где  $F_{\text{см}}$  — предельная сила упругого смятия [7].

После преобразований запишем выражение для полуоси пятна контакта:

$$a = \frac{1,5223 \cdot 3[\sigma_{\text{см}}] R_1 R_2 (E_1 + E_2)}{4E_1 E_2 (R_1 - R_2)}. \quad (22)$$

Глубину упругого смятия  $h_{\text{см}} = \alpha_y$  найдем из выражения [6, 8, 9]:

$$\alpha_y = 1,2313 \sqrt{\frac{P^2 (R_1 - R_2)}{E^2 R_1 R_2}}. \quad (23)$$

С учетом выражений (16)—(22) и после преобразований:

$$\alpha_y = \frac{1,5224 [\sigma_{\text{см}}]^2 R_1 R_2 (E_1 + E_2)^2}{E_1^2 E_2^2 (R_1 - R_2)} \sqrt{\frac{l^2}{0,316}}. \quad (24)$$

Подставим в выражение (12) равенства работ выражений (13)—(17), (24) и после преобразований получим:

$$F_{\text{уд}} \frac{v_0}{2} \Delta t = \frac{1,5227 \cdot 3[\sigma_{\text{см}}]^3 R_1^2 R_2^2 (E_1 + E_2)^2}{2E_1^3 E_2^3 (R_1 - R_2)^2} \sqrt[3]{\frac{l^2}{0,316}}. \quad (25)$$

Определим предельную скорость ударного взаимодействия фасок детали и втулки, при котором на их поверхностях будут возникать только упругие деформации:

$$v_0 = \frac{1,5223 \cdot l[\sigma_{\text{см}}] R_1 R_2 (E_1 + E_2)}{E_1 E_2 (R_1 - R_2)} \sqrt{\frac{7,215[\sigma_{\text{см}}]}{E_1 E_2}}. \quad (26)$$

Устройство с описанной кинематической схемой с обоснованными режимами работы показало надежную работу в условиях производства.

### Заключение

Представлена оригинальная кинематическая схема автоматизированного устройства установки упругих резиновых колец во внутренние канавки цилиндрических деталей.

Обоснованы режимы надежной работы устройства.

### Библиографический список

1. **Автоматизация** технологических и производственных процессов в машиностроении: учебник / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 656 с.
2. **Переналаживаемый** автоматический комплекс сборки головки цилиндра трактора / Ю.З. Житников и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 11. С. 14—19.
3. **Уплотнения** и уплотнительная техника: справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев и др. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
4. **Пат. RU № 2595081** С2. МПК В 23 Р 19/08. Устройство для автоматической установки упругого кольца во внутреннюю канавку детали / Ю.З. Житников и др.; заявл. 10.06.2014; опубл. 20.08.2016. Бюл. № 23.
5. **Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики. В 2 т. Т. 2. М.: Наука, 1979. 543 с.
6. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Динамика движения элементов механизмов при упругом и упруго-пластическом ударах о неподвижные и подвижные тела. Ковров: КГТА, 2014. 80 с.
7. **Феодосьев В.И.** Сопrotивление материалов М.: Наука, 1970. 544 с.
8. **Демидов С.Н.** Теория упругости: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1979. 432 с.
9. **Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И.** Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

И.П. Попов, канд. техн. наук (Курганский государственный университет)

E-mail: ip.popov@yandex.ru

## Реактансы и сасцептансы механических систем

Исследована возможность упрощения вычислений путем замены решения дифференциальных уравнений на более простые алгебраические методы. Использовано комплексное представление гармонических и связанных с ними величин. Рассмотрены параллельное и последовательное соединения потребителей механической мощности.

The possibility simplifying calculations by replacing the need to solve differential equations with simpler algebraic methods is investigated. A comprehensive representation of harmonic and related quantities is used. Parallel and series connections of mechanical power consumers are considered.

**Ключевые слова:** потребители механической мощности, вынужденные колебания, параллельное, последовательное соединение, резонанс сил, резонанс скоростей.

**Keywords:** consumers of mechanical power, forced vibrations, parallel, series connection, resonance of forces, resonance of speeds.

### Введение

Традиционный расчет механизмов при вынужденных колебаниях зачастую представляет собой непростую задачу [1, 2]. Чаще всего расчетчиков интересуют установившиеся режимы колебаний [3, 4].

**Цель исследования** — значительное упрощение вычислений путем замены решения дифференциальных уравнений на алгебраические методы.

Задачи исследования состоят в разработке алгоритмов расчетов механических систем.

Актуальность работы обусловлена тем, что механические колебания широко распространены в разнообразных технологических процессах [5–9].

Комплексное представление гармонических и связанных с ними величин широко используется в электротехнике.

### Схема параллельного соединения потребителей механической мощности

Скорость элементов  $m$ ,  $k$  и  $r$  механической системы одинаковая (рис. 1):

$$v = V \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $V$  — скорость системы;

$\omega$  — циклическая частота;

$t$  — время.

При этом реактивные силы отличаются:

$$f_m = m \frac{dv}{dt} = m \omega V \cos \omega t; \quad (2)$$

$$f_k = -kx = k \int v dt = -\frac{k}{\omega} V \cos \omega t; \quad (3)$$

$$f_r = rv = rV \sin \omega t, \quad (4)$$

где  $m$  — масса;  $k$  — коэффициент упругости;  $r$  — коэффициент вязкого сопротивления.

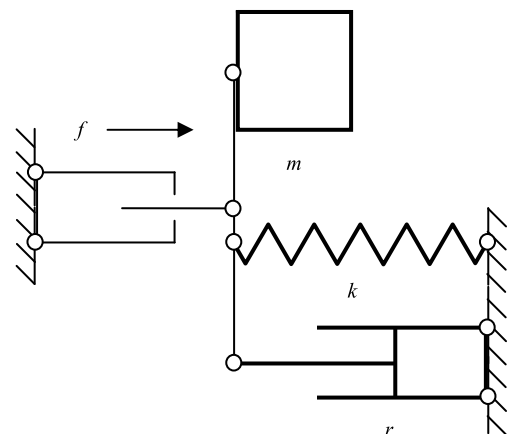


Рис. 1. Схема параллельного соединения

Результирующая сила:

$$\begin{aligned}
 f &= f_m + f_k + f_r = V \left[ \left( m\omega - \frac{k}{\omega} \right) \cos \omega t + r \sin \omega t \right] = \\
 &= V \sqrt{(m\omega - k/\omega)^2 + r^2} \left[ \frac{m\omega - k/\omega}{\sqrt{(m\omega - k/\omega)^2 + r^2}} \cos \omega t + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{r}{\sqrt{(m\omega - k/\omega)^2 + r^2}} \sin \omega t \right].
 \end{aligned}$$

Введем обозначение:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{m\omega - k/\omega}{r}. \quad (5)$$

При этом

$$\begin{aligned}
 f &= V \sqrt{(m\omega - k/\omega)^2 + r^2} \times \\
 &\times (\sin \varphi \cos \omega t + \cos \varphi \sin \omega t) = \\
 &= V \sqrt{(m\omega - k/\omega)^2 + r^2} \sin(\omega t + \varphi) = \\
 &= F \sin(\omega t + \varphi).
 \end{aligned} \quad (6)$$

Это классическое выражение вынужденных колебаний — результат решения дифференциального уравнения.

В рассматриваемом случае необходимости в дифференциальном уравнении не возникает.

Амплитуда результирующей силы:

$$F = Vz, \quad (7)$$

где  $z = \sqrt{(m\omega - k/\omega)^2 + r^2}$ , кг·с<sup>-1</sup>.

Первая (максвелловская) система механо-электрических аналогий имеет вид:

- $V \Rightarrow I$  (скорость  $\Rightarrow$  ток);
- $F \Rightarrow U$  (сила  $\Rightarrow$  напряжение);
- $m \Rightarrow L$  (масса  $\Rightarrow$  индуктивность);
- $k \Rightarrow 1/C$  (коэффициент упругости  $\Rightarrow$  величина, обратная емкости);
- $r \Rightarrow R$  (коэффициент вязкого сопротивления  $\Rightarrow$  сопротивление).

Американский физик Вебстер дополнил эти аналогии:

- $\omega t \Rightarrow \omega L$  (инертный реактанс  $\Rightarrow$  индуктивное сопротивление);
- $k/\omega \Rightarrow 1/(\omega C)$  (упругий реактанс  $\Rightarrow$  емкостное сопротивление).

Учитывая приведенные механоэлектрические аналогии, формула (7) является аналогом закона Ома:

$$U = IZ,$$

где  $Z = \sqrt{[\omega L - 1/(\omega C)]^2 + R^2}$  — сопротивление.

Таким образом, *механический импеданс* (impedance):

$$z = \sqrt{(m\omega - k/\omega)^2 + r^2}. \quad (8)$$

Соответственно этому, *механический реактанс* (reactance):

$$x = m\omega - \frac{k}{\omega}.$$

Если  $x = 0$ , то получаем формулу  $\omega = \sqrt{k/m}$  — классическое выражение, полученное значительно проще классического решения. При этом происходит *резонанс сил* [10]. Если  $r = 0$ , то  $z = 0$ . Механизм не препятствует источнику колебаний.

По аналогии с электротехникой  $r$  — *механический резистанс* (resistance).

### Комплексное описание для параллельной схемы соединения

Синусоидальная величина имеет следующую форму записи:

$$a = A \sin(\omega t + \varphi) = \operatorname{Im}[Ae^{i(\omega t + \varphi)}],$$

где  $Ae^{i(\omega t + \varphi)}$  — комплексный вектор.

Такие векторы, как правило, записывают для  $t = 0$ . В соответствии с этим

$$Ae^{i(\omega 0 + \varphi)} = Ae^{i\varphi} = \dot{A},$$

где  $\dot{A}$  — *комплексная амплитуда*.

Формула (1), таким образом, имеет следующий вариант записи:

$$\begin{aligned}
 v &= V \sin \omega t = \operatorname{Im}(Ve^{i\omega t}), \\
 \dot{V} &= Ve^{i0}.
 \end{aligned}$$

Из выражения (2) следует, что  $v$  отстает по фазе от  $f_m$  на  $\pi/2$ . Таким образом,

$$\dot{F}_m = m\omega \dot{V} e^{i\frac{\pi}{2}} = \underline{x}_m \dot{V}.$$

*Инертный реактанс* в комплексной записи:

$$\underline{x}_m = \omega m e^{i\frac{\pi}{2}} = i\omega m. \quad (9)$$

Несинусоидальные величины в комплексном представлении подчеркивают (синусоидальные отмечают точкой).



Амплитуда инертной силы (в комплексном изображении) имеет вид:

$$\dot{F}_m = \omega m e^{i\frac{\pi}{2}} \dot{V} e^{i0} = \omega m V e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

Точно так же, имея в виду формулы (3) и (4):

$$\dot{F}_k = -\frac{k}{\omega} \dot{V} e^{i\frac{\pi}{2}} = \underline{x}_k \dot{V}.$$

Упругий реактанс в комплексной записи:

$$\underline{x}_k = -\frac{k}{\omega} e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{k}{\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i \frac{k}{\omega}. \quad (10)$$

Амплитуда резистивной силы:

$$\dot{F}_r = r \dot{V} = \underline{r} \dot{V}.$$

Резистанс в комплексной записи:

$$\underline{r} = r.$$

В соответствии с этим амплитуды упругой и резистивной сил (в комплексном изображении) имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{F}_k &= \frac{k}{\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}} \dot{V} e^{i0} = \frac{k}{\omega} \dot{V} e^{-i\frac{\pi}{2}}; \\ \dot{F}_r &= r \dot{V} = r e^{i0} \dot{V} e^{i0}. \end{aligned}$$

Комплексные представления механических реактанса и импеданса:

$$\begin{aligned} \underline{x} &= \underline{x}_m + \underline{x}_k = \left( m\omega - \frac{k}{\omega} \right) e^{i\frac{\pi}{2}}; \\ \underline{z} &= r + \underline{x} = r + \left( m\omega - \frac{k}{\omega} \right) e^{i\frac{\pi}{2}}. \end{aligned}$$

Абсолютная величина импеданса совпадает с формулой (8):

$$Z = \sqrt{r^2 + \left( m\omega - \frac{k}{\omega} \right)^2}.$$

Фаза импеданса определяется формулой (5), поэтому

$$\underline{z} = Z e^{i\varphi}.$$

Сила внешнего источника гармонического воздействия имеет вид:

$$\dot{F} = \underline{z} \dot{V} = Z V e^{i\varphi}. \quad (11)$$

Это подтверждается формулой (6).

*Пример 1.* Исходные данные:  $\dot{F} = 100e^{i0}$  Н;  $\omega = 2$  рад/с;  $m = 10$  кг;  $k = 20$  кг·с<sup>-2</sup>;  $r = 7$  кг·с<sup>-1</sup>. Необходимо определить скорость и составляющие силы:

$$\underline{x}_m = \omega m e^{i90^\circ} = 20e^{i90^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\underline{x}_k = \frac{k}{\omega} e^{-i90^\circ} = 10e^{-i90^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{r^2 + (\underline{x}_m - \underline{x}_k)^2} = \\ &= \sqrt{7^2 + (20 - 10)^2} = 12,207 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}; \end{aligned}$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{\underline{x}_m - \underline{x}_k}{r} = \text{arctg} \frac{20 - 10}{7} = 55^\circ;$$

$$\underline{z} = Z e^{i\varphi} = 12,207 e^{i55^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{100e^{i0}}{12,207 e^{i55^\circ}} \approx 8,192 e^{-i55^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_m &= \underline{x}_m \dot{V} = 20e^{i90^\circ} \cdot 8,192 e^{-i55^\circ} = \\ &= 163,846 e^{i35^\circ} \text{ Н}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_k &= \underline{x}_k \dot{V} = 10e^{-i90^\circ} \cdot 8,192 e^{-i55^\circ} = \\ &= 81,923 e^{-i145^\circ} \text{ Н}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_r &= r \dot{V} = 7e^{i0} \cdot 8,192 e^{-i55^\circ} = \\ &= 57,344 e^{-i55^\circ} \text{ Н}. \end{aligned}$$

Как и следовало ожидать,

$$\begin{aligned} \dot{F}_m + \dot{F}_k + \dot{F}_r &= 163,846 e^{i35^\circ} + 81,923 e^{-i145^\circ} + \\ &+ 57,344 e^{-i55^\circ} = 100e^{i0} \text{ Н} = \dot{F}. \end{aligned}$$

Расчет с применением дифференциальных уравнений занял бы несколько страниц.

Данным примера 1 соответствует векторная диаграмма на рис. 2 (на стр. 3 обложки).

*Пример 2.* Исходные данные — как в примере 1,  $k = 40$  кг·с<sup>-2</sup>.

Для резонанса сил

$$\underline{x}_k = 20e^{-i90^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\underline{z} = r = 7e^{i0^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{100e^{i0}}{7e^{i0}} \approx 14,286 e^{i0^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_m &= \underline{x}_m \dot{V} = 20e^{i90^\circ} \cdot 14,286 e^{i0^\circ} = \\ &= 285,72 e^{i90^\circ} \text{ Н}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_k &= \underline{x}_k \dot{V} = 20e^{-i90^\circ} \cdot 14,286 e^{i0^\circ} = \\ &= 285,72 e^{-i90^\circ} \text{ Н}; \end{aligned}$$

$$\dot{F}_r = r \dot{V} = 7e^{i0} \cdot 14,286 e^{i0} = 100e^{i0} \text{ Н}.$$

Как и следовало ожидать,

$$\dot{F}_m + \dot{F}_k + \dot{F}_r = 285,72e^{i90^\circ} + 285,72e^{-i90^\circ} + 100e^{i0^\circ} = 100e^{i0^\circ} \text{ Н} = \dot{F} = \dot{F}_r.$$

Данным примера 2 соответствует векторная диаграмма на рис. 3 (на стр. 3 обложки).

### Схема последовательного соединения потребителей механической мощности

Сила на элементах механической системы одинаковая (рис. 4):

$$f = F \cos \omega t.$$

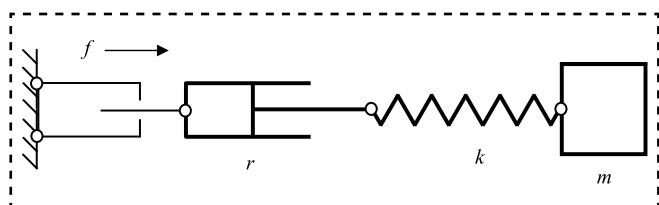


Рис. 4. Схема последовательного соединения

При этом скорости отличаются:

$$v_m = \frac{1}{m} \int f dt = \frac{F}{\omega m} \sin \omega t; \quad (13)$$

$$v_k = -\frac{1}{k} k \frac{dx}{dt} = \frac{1}{k} \frac{df}{dt} = -\frac{\omega F}{k} \sin \omega t; \quad (14)$$

$$v_r = \frac{f}{r} = \frac{F}{r} \cos \omega t. \quad (15)$$

Результирующая скорость:

$$\begin{aligned} v &= v_m + v_k + v_r = \\ &= F \left[ \left( \frac{1}{\omega m} - \frac{\omega}{k} \right) \sin \omega t + \frac{1}{r} \cos \omega t \right] = \\ &= F \sqrt{\left[ \frac{1}{(\omega m) - \omega/k} \right]^2 + (1/r)^2} \times \\ &\times \left[ \frac{1/(\omega m) - \omega/k}{\sqrt{\left[ \frac{1}{(\omega m) - \omega/k} \right]^2 + (1/r)^2}} \sin \omega t + \right. \\ &\left. + \frac{1/r}{\sqrt{\left[ \frac{1}{(\omega m) - \omega/k} \right]^2 + (1/r)^2}} \cos \omega t \right]; \\ \varphi &= \arctg \frac{1/(\omega m) - \omega/k}{1/r}. \end{aligned}$$

Выражение синусоидальной скорости для схемы последовательного соединения элементов механической системы:

$$\begin{aligned} v &= F \sqrt{\left[ \frac{1}{(\omega m) - \omega/k} \right]^2 + (1/r)^2} \times \\ &\times (\sin \varphi \sin \omega t + \cos \varphi \cos \omega t) = \\ &= F \sqrt{\left[ \frac{1}{(\omega m) - \omega/k} \right]^2 + (1/r)^2} \times \\ &\times \cos(\omega t - \varphi) = V \cos(\omega t - \varphi). \end{aligned}$$

Амплитуда результирующей скорости:

$$V = Fy;$$

$$y = \sqrt{\left[ \frac{1}{(\omega m) - \omega/k} \right]^2 + (1/r)^2}. \quad (16)$$

Из условия  $1/(\omega m) - \omega/k = 0$  следует выражение  $\omega = \sqrt{k/m}$ , полученное значительно проще классического решения. При этом происходит резонанс скоростей [10]. При  $1/r = 0$ ,  $y = 0$ . Механизм препятствует (абсолютно) источнику колебаний.

### Комплексное описание для последовательной схемы соединения

Алгоритм рассмотрения такой же, как и при параллельном соединении:

$$f = F \cos \omega t = \text{Re}(Fe^{i\omega t});$$

$$\dot{F} = Fe^{i\frac{\pi}{2}}.$$

Из выражения (13) следует, что  $f$  опережает по фазе  $v_m$  на  $\pi/2$ . Таким образом,

$$\dot{V}_m = -\frac{1}{\omega m} \dot{F} e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{\underline{x}_m} \dot{F} = \underline{b}_m \dot{F}.$$

Инертный сасцептанс (susceptance) в комплексной записи:

$$\underline{b}_m = \frac{1}{\omega m} e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i \frac{1}{\omega m} = \frac{1}{\underline{x}_m}.$$

Амплитуда инертной скорости (в комплексном изображении) имеет вид:

$$\dot{V}_m = \frac{1}{\omega m} e^{-i\frac{\pi}{2}} Fe^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{\omega m} Fe^{i0}.$$

Точно так же, имея в виду выражения (14) и (15),

$$\dot{V}_k = \frac{\omega}{k} \dot{F} e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{\underline{x}_k} \dot{F} = \underline{b}_k \dot{F}.$$



Упругий сассептанс в комплексной записи:

$$\underline{b}_k = \frac{\omega}{k} e^{i\frac{\pi}{2}} = i \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\underline{x}_k}.$$

В соответствии с этим амплитуды упругой и резистивной скоростей (в комплексном изображении) имеют вид:

$$\dot{V}_k = \frac{\omega}{k} e^{i\frac{\pi}{2}} F e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{\omega}{k} F e^{i\pi};$$

$$\dot{V}_r = \frac{1}{r} \dot{F} = g \dot{F} = g F e^{i\frac{\pi}{2}};$$

$$\underline{g} = g = \frac{1}{r}.$$

Это кондактанс (conductance) в комплексной записи.

Комплексные представления механических сассептанса и адмитанса (admittance):

$$\underline{b} = \underline{b}_k + \underline{b}_m = \left( \frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m} \right) e^{i\frac{\pi}{2}};$$

$$\underline{y} = g + \underline{b} = g + \left( \frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m} \right) e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

Абсолютная величина последнего совпадает с формулой (16)

$$Y = \sqrt{g^2 + (b_k - b_m)^2} = \sqrt{\frac{1}{r^2} + \left( \frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m} \right)^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{b_k - b_m}{g} = \arctg \frac{\omega/k - 1/(\omega m)}{g} =$$

$$= \arctg \left[ (m\omega - k/\omega) \frac{r}{mk} \right];$$

$$\underline{y} = Y e^{i\varphi}.$$

Скорость штока внешнего источника имеет вид:

$$\dot{V} = \underline{y} \dot{F} = Y e^{i\varphi} F e^{i\frac{\pi}{2}} = Y F e^{i(\varphi + \frac{\pi}{2})}. \quad (17)$$

Пример 3. Отличие от примера 1 состоит в том, что элементы соединены последовательно:

$$\underline{b}_m = \underline{x}_m^{-1} = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с};$$

$$\underline{b}_k = \underline{x}_k^{-1} = 10 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с};$$

$$g = r^{-1} = 14,286 \cdot 10^{-2} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с};$$

$$Y = \sqrt{g^2 + (b_k - b_m)^2} =$$

$$= \sqrt{(14,286 \cdot 10^{-2})^2 + (10 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2})^2} =$$

$$= 15,135 \cdot 10^{-2} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с};$$

$$\varphi = \arctg \frac{b_k - b_m}{g} =$$

$$= \arctg \frac{10 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}}{14,286 \cdot 10^{-2}} = 19,29^\circ;$$

$$\underline{y} = Y e^{i\varphi} = 15,135 \cdot 10^{-2} e^{i19,29^\circ} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с};$$

$$\dot{V} = \underline{y} \dot{F} = 15,135 \cdot 10^{-2} e^{i19,29^\circ} \cdot 100 =$$

$$= 15,135 e^{i19,29^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{V}_m = \underline{b}_m \dot{F} = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 100 =$$

$$= 5 e^{-i90^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{V}_k = \underline{b}_k \dot{F} = 10 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 100 =$$

$$= 10 e^{i90^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{V}_r = g \dot{F} = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 14,286 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Как и следовало ожидать,

$$\dot{V}_m + \dot{V}_k + \dot{V}_r = 5 e^{-i90^\circ} + 10 e^{i90^\circ} + 14,286 =$$

$$= 15,135 e^{i19,29^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = \dot{V}.$$

Расчет с применением дифференциальных уравнений занял бы несколько страниц.

Данным примера 3 соответствует векторная диаграмма на рис. 5 (на стр. 3 обложки).

Пример 4. Отличие от примера 2 состоит в том, что элементы соединены последовательно.

Для резонанса скоростей

$$\underline{b}_k = 5 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с};$$

$$Y = g = 14,286 \cdot 10^{-2} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с};$$

$$\varphi = 0^\circ;$$

$$\underline{y} = Y e^{i\varphi} = 14,286 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с};$$

$$\dot{V} = \underline{y} \dot{F} = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 100 =$$

$$= 14,286 e^{i0^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{V}_k = \underline{b}_k \dot{F} = 5 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 100 =$$

$$= 5 e^{i90^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$



Как и следовало ожидать,

$$\begin{aligned}\dot{V}_m + \dot{V}_k + \dot{V}_r &= 5e^{-i90^\circ} + 5e^{i90^\circ} + 14,286 = \\ &= 14,286e^{i0^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \quad \dot{V} = \dot{V}_r.\end{aligned}$$

Данным примера 4 соответствует векторная диаграмма на рис. 6 (на стр. 3 обложки).

### Заключение

Использование символического (комплексного) описания механических систем при вынужденных гармонических колебаниях (в установившемся режиме) позволило отказаться от чрезвычайно громоздкого и трудоемкого алгоритма расчета, связанного с решением дифференциальных уравнений и заменить его простыми и наглядными алгебраическими операциями. Благодаря этому время расчетов уменьшается в разы.

Векторные диаграммы, не являясь необходимой составляющей исследования механических систем, имеют существенное методическое значение, поскольку показывают количественные и фазные соотношения между параметрами систем.

### Библиографический список

1. **Попов И.П.** Дифференциальные уравнения двух механических резонансов // Прикладная физика и математика. 2019. № 2. С. 37–40. DOI: 10.25791/pfim.02.2019.599.

2. **Попов И.П.** О резонансе и антирезонансе // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 4. С. 45–48.

3. **Роров И.Р.** Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2012. Vol. 76. Iss. 4. P. 393–395. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2012.09.005.

4. **Роров И.Р.** Theory of a Multi-Inert Oscillator // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49. No. 8. P. 16–20. DOI: 10.3103/S1052618820080105.

5. **Эрлих Б.М.** Методика активного возбуждения колебаний с характеристиками сложного типа в машинах и механизмах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 3. С. 131–136.

6. **Варганов М.В., Чан Ч.Та.** Математическая модель роботизированной сборки при наличии вращения схвата и низкочастотных колебаний // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 7. С. 299–304.

7. **Кристалль М.Г., Суриков А.А.** Настройка загрузочного устройства с двухкомпонентным виброприводом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 6. С. 285–288.

8. **Лапшин В.П., Христофорова В.В., Халина Е.В.** Моделирование динамики вибрационных движений индентора при выполнении операции выглаживания с учетом влияния термодинамической подсистемы // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 4. С. 166–172.

9. **Волков Е.Б., Ситдикова С.В.** Анализ режимных параметров вибрационного грохота на основе динамической модели его работы // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 1. С. 31–35.

10. **Попов И.П.** Резонансы сил и скоростей // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2019. № 4(47). С. 62–66. DOI: 10.17072/1993-0550-2019-4-62-66.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: [mashpubl@mashin.ru](mailto:mashpubl@mashin.ru);

редакции журнала: [sboraka@mashin.ru](mailto:sboraka@mashin.ru), <http://www.mashin.ru>

Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.

Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 23.12.2020. Подписано в печать 17.01.2021. Формат 60 × 88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солюшнз". Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.