ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

11 2016 (196)

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

Денисенко А.Ф., Царфин Б.А. Оценка влияния отклонений от плоскостности планшайбы стола координатно-расточного станка на точность базирования обрабатываемых деталей . . . 3

Волков В.М., Должиков С.Н. Станок для притирки клапанов локомотивного тормозного компрессора . . . 7

Экономика и организация сборочного производства

Руднева Л.Ю. Технико-экономические основы сборки агрегатов точной механики методом групповой взаимозаменяемости . . . 10

Современные технологии сборки

Березин С.Я., Свиридов Ю.И. Использование концентрированных потоков акустической энергии при сборке резьбовых соединений с радиальным натягом . . . 13

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Есаулов В.В., Колосков А.В., Шашков А.Ю., Рожко Т.Е. Исследование процесса полимеризации компаунда "Герсил-312" в зависимости от концентрации катализатора и влажности окружающей среды . . . 17

Кохановский В.А., Иванов С.И., Петренко А.А. Армирующий каркас антифрикционных композитов . . . 20

Экология и безопасность сборочных работ

Жуков В.В., Степанов С.А., Бычков С.П., Рябов В.Т. Разработка системы регенерации абразивного материала для установок резки маскированных кремниевых пластин . . . 24

Трение и смазка в машинах и механизмах

Добров И.В. К вопросу теории механики процесса внешнего трения скольжения твердых тел по горизонтальной плоскости (часть 1) . . . 29

Болдырев С.В., Белоусов А.М., Бударова О.П. Экспериментальные исследования по определению влияния механических примесей, содержащихся в масле, на износ качающего узла аксиально-поршневого насоса . . . 37

Гурьянов Г.Н. Влияние коэффициентов контактного трения и вытяжки проволоки на радиальную силу в рабочем конусе волоки . . . 40

В помощь конструктору, технологу

Рапилбекова Н.С. Теплопроводность в многослойных конструкциях с изменяющейся границей . . . 44

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — **79748**, Объединенному каталогу "Пресса России" — **84967**, каталогу "Почта России" — **60257**) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98. Факс 8 (499) 269-48-97

E-mail: sborka@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.

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н., чл.-кор. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

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.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

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

В.И. КОЛЕСНИКОВ, акад. РАН и РИА (зам. гл. редактора)
А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

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.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.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. БАСИНЮК, 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.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2016

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

11 2016 (196)

CONTENTS

Production tools and machinery for assembly

Denisenko A.F., Carfin B.A. Evaluation of the influence of flatness of the faceplate table of the coordinate-boring machine on precision machined parts based . . . 3

Volkov V.M., Dolzhikov S.N. Machine for lapping valves locomotive brake compressor . . . 7

Economy and the organization of assembly

Rudneva L.Yu. Technical and economic basis for the assembly of precision mechanics method group interchangeability . . . 10

Modern technologies in assembly

Berezin S.Ya., Sviridov Yu.I. Use of concentrated acoustic energy flows for assembly screw joints with radial tightness . . . 13

Quality assurance. Testing. Monitoring

Esaulov V.V., Koloskov A.V., Shashkov A.Yu., Rozhko T.E. Investigation of the process polymerization the compound "Gersil-312" depending on the concentration the catalyst and humidity environment . . . 17

Kokhanovsky V.A., Ivanov S.I., Petrenko A.A. Reinforcing fiber carcass of the antifriction composites . . . 20

Ecology and safety in assembly

Zhukov V.V., Stepanov S.A., Bychkov S.P., Ryabov V.T. Design of a abrasive material regeneration system for masked silicon wafers cutting machines . . . 24

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Dobrov I.V. To the question of mechanics theory of the process of external friction sliding solids on a horizontal plane (part 1) . . . 29

Boldyrev S.V., Belousov A.M., Budarova O.P. Experimental research to determine the influence of contained in oil mechanical impurities at pumping unit of axial-piston pump . . . 37

Guryanov G.N. Drag influence of coefficients of contact friction and the extract of the wire on radial force in the working cone . . . 40

Industrial and design engineer's aid

Rapilbekova N.S. The head conductivity in many layer constructions with changing boundary . . . 44

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" — **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" — **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98. Fax: 8 (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.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.

Chair of Editorial Advisory Board —
Member of Russian Academy of Science
F.M. MITENKOV

Editors

MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor)
V.V. BARDUSHKIN
I.A. BUYANOVSKY
M.V. VARTANOV
A.A. GUSEV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

VOLGOGRAD
V.G. KARABAN'
M.G. KRISTAL
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV

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

NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTYUKOV

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
V.I. KOLESNIKOV
A.A. RYZHKIN

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

SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

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. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

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

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2016

УДК 621.906.013

А.Ф. Денисенко, *д-р техн. наук (Самарский государственный технический университет),*
Б.А. Царфин *(ЗАО "Стан-Самара")*
E-mail: ask@samgtu.ru

Оценка влияния отклонений от плоскостности планшайбы стола координатно-расточного станка на точность базирования обрабатываемых деталей

Приведены результаты определения погрешностей базирования прямоугольных заготовок на поверхности планшайбы делительного стола, используемого для расширения технологических возможностей координатно-расточных станков. При моделировании зеркала стола конической, сферической поверхностью и параболоидом вращения получены аналитические зависимости для определения погрешностей базирования прямоугольных заготовок. Проведен анализ влияния размеров заготовки и места ее расположения на столе на погрешности базирования.

The article presents the results of the determination of errors based rectangular blanks on the surface of the faceplate indexing table that is used to expand the technological capabilities of coordinate boring machines. When modeling a tabletop conical, spherical surface and the paraboloid of revolution obtained analytical dependencies for determination of errors based rectangular blanks. The analysis of the influence of the size of the workpiece and its location on the table on errors based.

Ключевые слова: делительный стол, планшайба, базирование, осесимметричная модель, отклонение от плоскостности.

Keywords: dividing a table, faceplate, locating, axisymmetric model, deviation from flatness.

В формирование качественных результатов изготовления деталей на металлорежущих станках наряду с основными подсистемами станка вносят существенный вклад станочные приспособления.

Относительное расположение поверхностей обработанной детали, как одного из элементов понятия точности, зависит не только от геометрической точности станка, но, главным образом, от положения заготовки относительно механизмов и узлов станка, обеспечивающих траектории движений формообразования, т.е. от точности установки, которая определяется статическими и динамическими погрешностями [1].

При базировании и закреплении заготовки в рабочей зоне станка ей придается требуемое положение относительно выбранной системы координат [2].

Вследствие влияния отклонений размеров, формы и расположения поверхностей заготовки и приспособления, используемых при базировании, возникает погрешность базирования, представляющая собой отклонение фактически достигнутого положения заготовки при базировании от требуемого [2].

Погрешности базирования в общем случае включают систематические и случайные составляющие. Систематические погрешности могут быть компенсированы при настройке технологической системы.

Численные значения погрешностей базирования устанавливаются геометрическим расчетом или с помощью размерного анализа.

Для расширения технологических возможностей координатно-расточных станков (КРС) широко используют поворотные делительные столы. В этом случае одной из составляющих, определяющих точность обработки, является точность базирования заготовки на зеркале стола.

Допуск на прямолинейность рабочей поверхности планшайбы стола в зависимости от диаметра

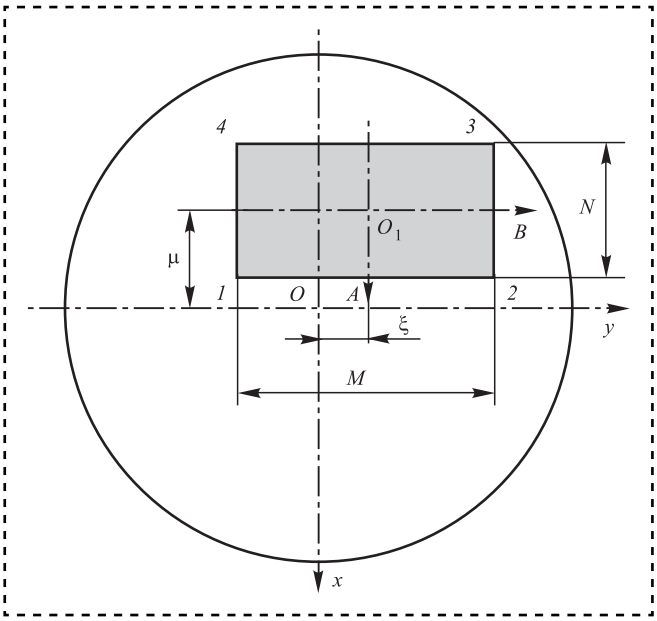


Рис. 1. Расположение базирующей поверхности на зеркале стола

для столов класса точности А составляет 6...12 мкм, а для столов класса точности С — 4...8 мкм (меньшие значения относятся к столам меньшего диаметра) [3]. Для обеспечения надежного базирования допускается только вогнутость.

В универсальном случае базирующая поверхность обрабатываемых деталей представляет собой прямоугольник (рис. 1) с произвольным соотношением размеров *M*, *N*, а ее расположение на зеркале стола определяется размерами μ, ξ.

Задачи пространственной ориентации твердых тел относительно выбранной системы координат решают теоретически посредством наложения определенных ограничений на возможные перемещения заготовки в пространстве [4].

Механические связи, возникающие на базовых поверхностях стола и заготовки, должны рассматриваться в полном соответствии с геометрическими характеристиками базирующих поверхностей.

Для случая, когда базирующая поверхность обрабатываемой детали идеальная, а поверхность стола осесимметрична относительно оси *z*, необходимым условием базирования плоской прямоугольной поверхности с вогнутой криволинейностью является контакт по трем точкам (углам) детали. В этом случае в зависимости от *M*, *N*, μ, ξ и величины отклонения от плоскостности поверхности стола возможны следующие варианты базирования: по точкам *1-2-3*; *1-3-4*; *1-2-4*; *2-3-4*.

Рассмотрим условия базирования при моделировании зеркала стола конической, сферической поверхностью и параболоидом вращения. Уравнения поверхности стола имеют вид:

— коническая поверхность:

$$z = \frac{\Delta}{R}\sqrt{x^2 + y^2} - \Delta;$$

— сферическая поверхность:

$$z = \frac{R^2 - \Delta^2}{2\Delta} - \sqrt{\frac{R^2 + \Delta^2}{2\Delta} - \left(x^2 + y^2\right)};$$

— параболоид вращения:

$$z = \frac{\Delta\left(x^2 + y^2\right)}{R^2} - \Delta,$$

где R — радиус стола;

Δ — отклонение от плоскостности.

Погрешности детали при базировании могут быть определены положением вновь введенной координатной системы, плоскость AO_1B которой связанна с опорной поверхностью детали.

Для частного случая, когда $\mu = 0$, базирование детали будет по всем четырем углам (точки *1*, *2*, *3*, *4*) и задача может быть сведена к плоской (рис. 2).

Связь координатных систем yOz и BO_1C определяется выражениями

$$y = B\cos\varphi - C\sin\varphi + \xi;\ \ z = B\sin\varphi + C\cos\varphi - \nu.$$

Так как для точки *1* — $B = -0{,}5M$; $C = 0$, а для точки *2* — $B = 0{,}5M$; $C = 0$, то координаты этих точек:

точка *1*

$$y = -0{,}5M\cos\varphi + \xi;\ \ z = -0{,}5M\sin\varphi - \nu; \qquad (1)$$

точка *2*

$$y = 0{,}5M\cos\varphi + \xi;\ \ z = 0{,}5M\sin\varphi - \nu. \qquad (2)$$

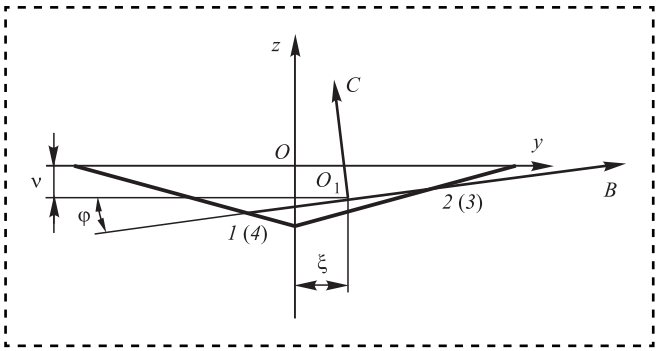


Рис. 2. Частный случай базирования (μ = 0; *N* = 0) на конической поверхности стола

Поскольку точки *1* и *2* должны лежать на конической поверхности, то точка *1* лежит на прямой

$$z = \frac{\Delta}{R} y - \Delta; \qquad (3)$$

точка *2* — на прямой

$$z = -\frac{\Delta}{R} y - \Delta; \qquad (4)$$

Подставляя координаты точек *1* и *2* (формулы (1) и (2)) в выражения (3) и (4), найдем неизвестные φ и ν (для случая $\xi < 0{,}5M$ и $\xi + 0{,}5M < R$):

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{2\xi}{M}\right); \ \nu = \Delta\left(1 - \frac{M}{2R}\sqrt{1 - \frac{4\xi^2}{M^2}}\right).$$

Если учесть размер детали $N\,(N \neq 0)$, то точки *1* и *2* должны лежать на кривой, полученной сечением конической поверхности плоскостью $x = 0{,}5N$:

$$z = \frac{\Delta}{R}\sqrt{\frac{N^2}{4} + y^2} - \Delta. \qquad (5)$$

Подставляя координаты точек *1* и *2* в выражение (5), получим систему уравнений для определения φ и ν:

$$\begin{cases} -0{,}5M\sin\varphi - \nu = \dfrac{\Delta}{R}\sqrt{\dfrac{N^2}{4} + (-0{,}5M\cos\varphi + \xi)^2} - \Delta; \\ 0{,}5M\sin\varphi - \nu = \dfrac{\Delta}{R}\sqrt{\dfrac{N^2}{4} + (0{,}5M\cos\varphi + \xi)^2} - \Delta, \end{cases}$$

откуда

$$\varphi = \arccos\sqrt{\frac{-M^2W + \sqrt{M^4W^2 - 4M^4R^2V\left(R^2 + \Delta^2\right)}}{4M^4R^2\left(R^2 + \Delta^2\right)}};$$

$$\nu = \Delta - \frac{\Delta}{2R}\left[\sqrt{\frac{N^2}{4} + \left(-\frac{M}{2}\cos\varphi + \xi\right)^2} + \right.$$

$$\left. + \sqrt{\frac{N^2}{4} + \left(\frac{M}{2}\cos\varphi + \xi\right)^2}\right];$$

$$V = T^2 - \Delta^4\left(N^2 + 4\xi^2\right)^2;$$

$$T = \Delta^2N^2 + 4\Delta^2\xi^2 - 2R^2M^2;$$

$$W = T\left(2R^2 + \Delta^2\right) - \Delta^4N^2 + 4\Delta^4\xi^2.$$

Аналогично можно получить зависимости для φ и ν при моделировании поверхности стола в виде части сферы и параболоида вращения:

— для сферической формы поверхности стола:

- при $N = 0$

$$\varphi = \arccos\sqrt{1 - \frac{4\xi^2}{4(\delta + \Delta)^2 - M^2}};$$

$$\delta = \frac{R^2 - \Delta^2}{2\Delta};$$

$$\nu = -\delta + \frac{1}{2}\left[\sqrt{(\delta + \Delta)^2 - \left(-\frac{M}{2}\cos\varphi + \xi\right)^2} + \right.$$

$$\left. + \sqrt{(\delta + \Delta)^2 - \left(\frac{M}{2}\cos\varphi + \xi\right)^2}\right];$$

- при $N \neq 0$

$$\varphi = \arccos\sqrt{1 - \frac{4\xi^2}{4(\delta + \Delta)^2 - N^2 - M^2}};$$

$$\nu = -\delta + \frac{1}{2}\left[\sqrt{(\delta + \Delta)^2 - \frac{N^2}{4} - \left(-\frac{M}{2}\cos\varphi + \xi\right)^2} + \right.$$

$$\left. + \sqrt{(\delta + \Delta)^2 - \frac{N^2}{4} - \left(\frac{M}{2}\cos\varphi + \xi\right)^2}\right];$$

— для поверхности стола в виде параболоида вращения:

- при $N = 0$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{2\Delta\xi}{R^2}; \ \nu = \Delta - \frac{\Delta}{2R^2}\left[\frac{M^2}{2}(\cos\varphi)^2 + 2\xi^2\right];$$

- при $N \neq 0$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{2\Delta\xi}{R^2}; \ \nu = \Delta - \frac{\Delta}{2R^2}\left[\frac{N^2}{2} + \frac{M^2}{2}(\cos\varphi)^2 + 2\xi^2\right].$$

Смещение заготовки относительно плоскости стола ν линейно увеличивается с ростом отклонений от плоскостности и учет ширины заготовки при моделировании отклонений от плоскостности в виде сферы и параболоида не является необходимым (расхождение результатов не превышает 1 %). Для конической поверхности разница результатов составляет 7,0 % (причем большие результаты получаются при учете параметра N).

Результаты, полученные для сферы и параболоида, практически совпадают (расхождение менее 0,001 %) и превышают значения для конуса: при $N = 0$ на 15,0 % и при $N = 100$ мм — на 6,4 %.

Влияние изменения длины заготовки M при неизменных значениях ξ при конической поверхности стола показано на рис. 3.

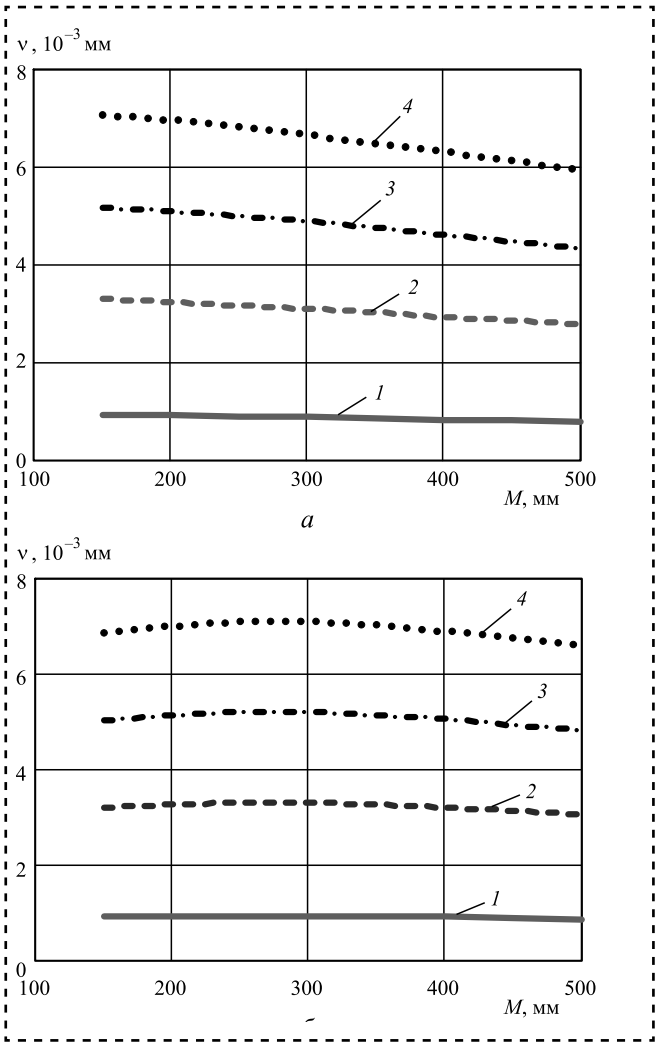


Рис. 3. Смещение заготовки ν относительно конической поверхности стола при изменении длины заготовки *M* (*N* = 100 мм; *R* = 500 мм):
а — ξ = 50 мм; *б* — ξ = 140 мм; *1* — $\Delta = 1\cdot10^{-3}$ мм; *2* — $\Delta = 3{,}5\cdot10^{-3}$ мм; *3* — $\Delta = 5{,}5\cdot10^{-3}$ мм; *4* — $\Delta = 7{,}5\cdot10^{-3}$ мм

Влияние длины заготовки *M* на смещение ν становится заметным при увеличении отклонения от плоскостности. Если заготовка располагается ближе к центру стола (небольшие значения ξ) влияние размера *M* более существенно: наблюдается постепенное уменьшение ν по мере роста *M*. При смещении же заготовки к краю стола (см. рис. 3, *б*) на кривых наблюдается максимум.

Влияние значения ξ на величину ν возрастает при увеличении отклонения от плоскостности. При значительных размерах *M* влияние ξ более существенно: наблюдается постепенное возрастание ν по мере роста ξ.

Выводы

1. Полученные аналитические зависимости учитывают отклонения от плоскостности стола на точность базирования заготовок с прямоугольной формой базовой поверхности. Указанные зависимости позволяют минимизировать погрешности базирования путем выбора места базирования на поверхности стола в зависимости от размеров заготовки.

2. Результаты моделирования поверхности стола конической, сферической поверхностью и параболоидом вращения показали, что при моделировании сферической поверхностью и параболоидом вращения получаются практически одинаковые результаты. Результаты, полученные при моделировании поверхности стола конической поверхностью, 6,4...15 % (в зависимости от ширины заготовки) меньше, чем при использовании двух других моделей.

3. При значительных длинах заготовки с точки зрения минимизации параметров ν и φ предпочтение следует отдать базированию в центральных зонах стола.

Библиографический список

1. **Микитянский В.В., Микитянская Л.М.** К вопросу об общей теории точности станочных приспособлений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 5. С. 26—29.

2. **ГОСТ 21495—76.** Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения.

3. **ГОСТ 16163—90.** Столы поворотные делительные координатно-расточных и координатно-шлифовальных станков. Основные размеры. Нормы точности.

4. **Семенов А.Н., Наумова С.А.** Влияние закономерностей базирования деталей на функциональное качество и надежность машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 12. С. 3—8.

УДК 629.4.077 (075.32)

В.М. Волков, С.Н. Должиков, *канд-ты техн. наук*
(Омский государственный университет путей сообщения)
E-mail: izminst@mail.ru

Станок для притирки клапанов локомотивного тормозного компрессора

Представлены конструкция и принцип действия станка для одновременной притирки комплекта всасывающих и нагнетательных клапанов тормозного локомотивного компрессора.

A design and operation of the machine for simultaneous grinding of brake valves set of locomotive compressor is presented.

Ключевые слова: двухступенчатый компрессор, притир, клапанная пластина, седло клапана, траверса.

Keywords: double-acting compressor, lap, plate seat, valve seat, cross-piece.

Подвижной состав железных дорог в обязательном порядке оснащается надежным тормозным оборудованием. Независимо от вида тяги на локомотиве устанавливают тормозной компрессор большой производительности, который нагнетает в тормозную систему сжатый воздух под давлением 8...9 кгс/см^2 (78...88)·10^4 Па [1, 2]. Тормозная магистраль проходит по всей длине поезда и питает сжатым воздухом пневматические тормоза локомотива и вагонов. Поскольку грузовые поезда имеют значительную длину и насчитывают большое число вагонов, то и производительность компрессоров должна быть достаточной для того, чтобы при торможении поезда тормоза безотказно срабатывали. На магистральных локомотивах применяют двухступенчатые компрессоры типа КТ6, КТ7 производительностью 5,3 м^3/мин с приводом от электродвигателя или от коленчатого вала дизеля. Двухступенчатое сжатие снижает температуру воздуха в конце цикла, улучшает условия смазывания компрессора, а также уменьшает потребляемую компрессором мощность. Снижение потребляемой мощности происходит за счет работы, сэкономленной вследствие охлаждения воздуха в промежуточном холодильнике.

Компрессоры оборудованы клапанными коробками, разделенными внутренней перегородкой на две полости: всасывающую и нагнетательную со своими клапанами (рис. 1). Обе конструкции имеют седло *1*, обойму *2*, большую *3* и малую *4* пластины, конические ленточные пружины *5* (по три на каждую пластину), шпильку *6* и корончатую гайку *7*.

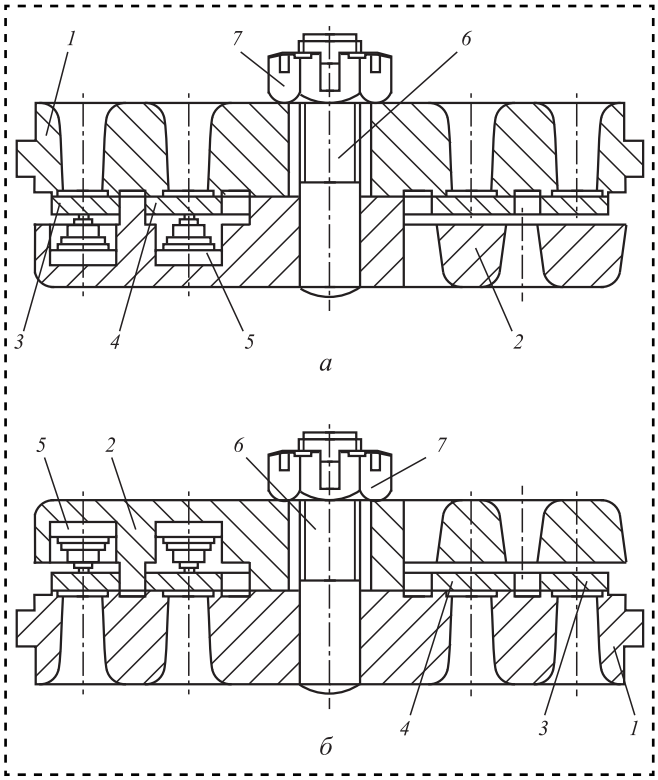


Рис. 1. Клапаны тормозного компрессора:
а — всасывающий; *б* — нагнетательный

Седла по окружности имеют окна для пропускания воздуха общим проходным сечением 41,5 см^2. Обе клапанные пластины выполнены из стали 3Х13 в виде колец толщиной 2 мм. Диаметры большой пластины — 108 и 81 мм, малой 68 и 40 мм.

При работе компрессора клапанные пластины под воздействием сжатого воздуха и конических пружин совершают возвратно-поступательные перемещения в вертикальном направлении на высоту 2,5...2,7 мм.

При текущих ремонтах компрессоров покоробленные и изношенные по толщине более чем на 0,2 мм пластины заменяют, а при капитальном ремонте заменяют независимо от степени износа [3]. Новые клапанные пластины притирают к седлам клапанов, при этом ширина притираемого пояска должна быть не менее 1,4 мм. Клапан с притертыми пластинами испытывают на плотность. Допускается падение давления с 8,0 ($78\cdot10^4$) до 7,5 кгс/см^2 ($74\cdot10^4$ Па) в резервуаре объемом 50 л не быстрее, чем за 2 мин.

Ручная притирка пластин клапанов представляет собой трудоемкий и продолжительный по времени процесс, и даже использование малой механизации с применением оборудованного специальным образом сверлильного станка доводит время притирания одного клапана до 43 мин [4]. При заводских ремонтах локомотивов применяют специальные станки для одновременной притирки двенадцати клапанных пластин [5]. Но такой станок обеспечивает не взаимную притирку пластин и клапанов, а фактически полирует поверхности пластин, поверхности же клапанов остаются непритертыми. Станок имеет сложную кинематическую схему и требует точной центровки вращающихся частей.

Для повышения производительности труда при притирке и обеспечения индивидуального притирания пластин и клапанов разработана конструкция станка, кинематическая схема которого представлена на рис. 2 [6].

Станок состоит из плиты *1*, на которой сверху расположены шесть зубчатых колес *2*, находящихся друг с другом в зацеплении, но образующих незамкнутую кинематическую цепь. Одно из зубчатых колес через редуктор *3* соединено с электродвигателем *4*. Сверху на зубчатые колеса устанавливают основания *5*, в которые укладывают клапанные пластины *6*, а они прижимаются седлом клапана и притиром *7* с пружиной *8*. Притиры закреплены попарно в треугольной траверсе *9* с возможностью перемещения по колонне *10*. Верхняя часть колонны имеет

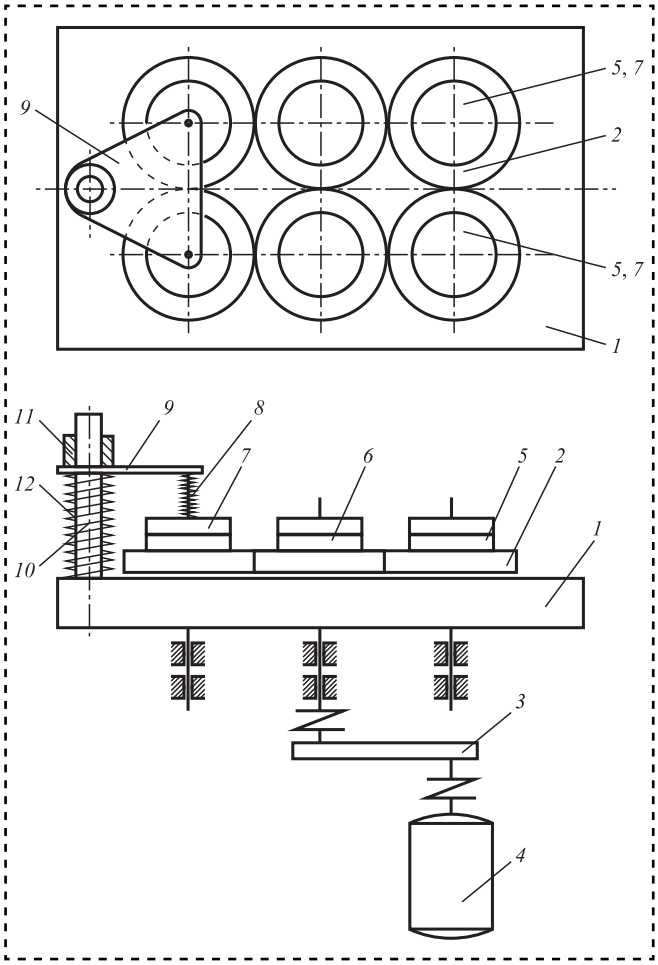


Рис. 2. Кинематическая схема станка

кольцевые проточки, специальным зажимом *11* и пружиной *12* траверсу *9* можно устанавливать на различную высоту.

На рис. 3 показан общий вид станка и его верхняя часть, где установлены притиры. Внутри корпуса *1* размещены электродвигатель, блок управления, двухступенчатый редуктор и соединительные муфты. Опорная плита, на которой расположены основные узлы притирочного механизма, закрыта предохранительным кожухом *2*. Под кожухом расположены зубчатые колеса, сверху к ним жестко прикреплены фасонные основания *10*, на которые укладываются пластины и устанавливаются седла клапанов. На плите смонтировано три колонны *3*, имеющие кольцевые проточки в верхней части. На колонны надевают пружины *8*, а на них укладывают траверсы *5*, фиксируемые замками *4*. Каждая траверса имеет по два стакана *7*, внутри которых располагаются нажимные пружины *6* и притиры *9*. Управляется станок переключателем *11* и цифровым индикатором *12*. Для транспортировки

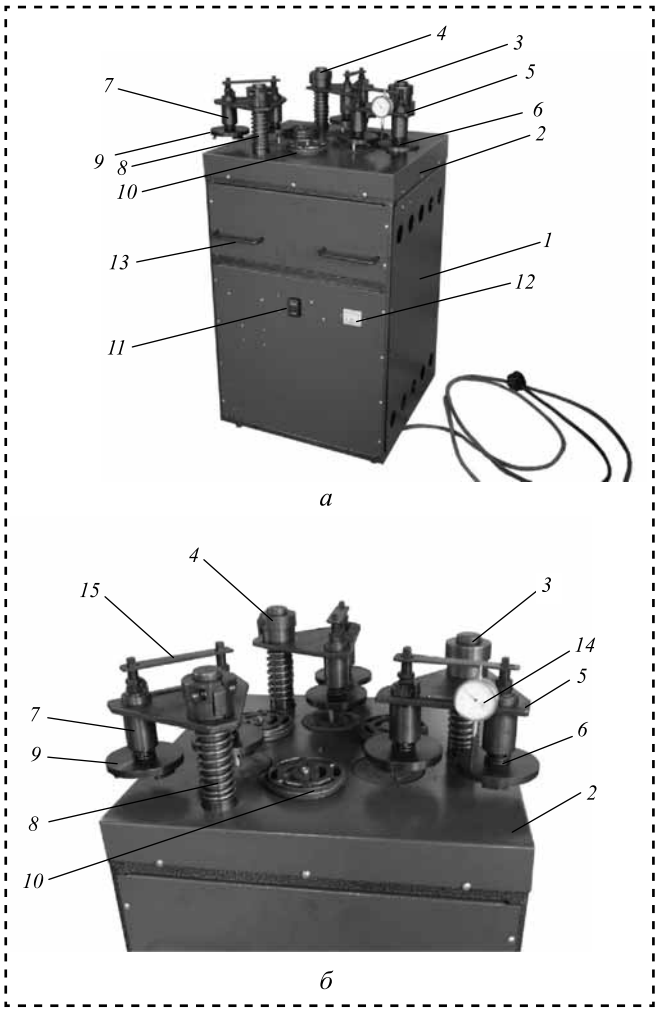


Рис. 3. Станок:
а — общий вид; *б* — верхняя часть

станка предусмотрены четыре ручки *13*. Станок рассчитан на различное число пар притираемых клапанов — от одной до шести. Масса станка составляет 110 кг.

Станок работает следующим образом. На основания *10* (см. рис. 3) укладывают по две пластины (большая и малая) притираемых клапанов, а сверху устанавливают седла клапанов. На пару седел по колонне *3* опускают траверсу *5* с установленными в ней притирами *9*. При этом пружины *8* незначительно сжимаются, а траверса с притирами фиксируется замками *4*. Необходимая сила, обеспечивающая прижатие пластин к седлам клапанов, создается с помощью пружин *6*, установленных в стаканах *7*. Первоначально силы нажатия на каждую притираемую пару одинаковы. Пружины предварительно оттарированы (тарировочные графики приложены к паспорту станка). Вращая специальным ключом за хвостовик притир *9* и контролируя деформацию пружин с помощью индикатора часового типа *14*, устанавливают требуемую силу нажатия. В процессе приработки ее можно менять в зависимости от величины полученного притираемого пояска.

В комплекте станка имеется один индикатор ИЧ-10, который поочередно устанавливают на специальном кронштейне *15*, закрепленном на траверсе *5*. Удлинитель индикатора свободным торцом упирается в верхнюю часть притира, измеряя его перемещение (деформацию пружины), и используя тарировочный график, определяют силу прижатия притира с седлом клапана к клапанным пластинам. Дополнительно можно самостоятельно установить пять индикаторов, чтобы контролировать одновременно силы прижатия всех притиров. Для предотвращения самоотвинчивания притира и произвольного изменения притирочной силы на их хвостовики надевают предохранительные планки *17*.

Станок работает в реверсивном режиме: по 25 с основания с пластинами вращаются по часовой стрелке и против часовой стрелки, 5 с — на переключение обратного хода. Общее время притирки задают блоком управления, переключение направления вращения автоматическое.

Предложенная конструкция станка предназначена для притирки клапанов локомотивных компрессоров, но может быть использована и для промышленных компрессоров, где применяют клапаны в виде пластин. Для этого на вращающиеся основания станка устанавливают фасонные основания другой конфигурации и изменяют форму концевой части притиров.

Библиографический список

1. **Крылов В.И., Крылов В.В.** Автоматические тормоза подвижного состава. М.: Транспорт, 1983. 360 с.

2. **Афонин Г.С., Барщенков В.Н., Кондратьев Н.В.** Автоматические тормоза подвижного состава. М.: Академия, 2011. 320 с.

3. **Инструкция** по техническому обслуживанию, ремонту и испытанию тормозного оборудования локомотивов и моторвагонного подвижного состава, ЦТ-533. М.: МПС. 1998. 213 с.

4. **Айрумянц М.А.** Станок для механической притирки клапанов компрессора КТ6 // Электрическая и тепловозная тяга. 1967. № 3. С. 13.

5. **Каталог** средств механизации и автоматизации, применяемых при заводском ремонте тепловозов. Т. 1. М.: ПКБ ЦТВР, 1964. С. 46—47.

6. **Пат. 2576983 РФ, МПК B 24 B 15/08.** Устройство для притирания клапанов тормозного компрессора / С.В. Пахоменко, В.М. Волков, С.Н. Должиков.

УДК 621.9

Л.Ю. Руднева, *канд. техн. наук*
(Московский технический университет МИРЭА)
E-mail: rudnewal@ list.ru

Технико-экономические основы сборки агрегатов точной механики методом групповой взаимозаменяемости

Установлен обобщенный экономический критерий сборки агрегатов точной механики методом групповой взаимозаменяемости в зависимости от числа комплектов, деталей, видов деталей в комплектах и других параметров сборки.

Has a generation economic criterion assembly of precision mechanics method. Interchangeability depending on the number of sets, parts kits and build options.

Ключевые слова: сборка, технология, взаимозаменяемость.

Keywords: assembly, technology, interchangeability.

В производстве агрегатов точной механики для повышения качества большое значение имеет выбор метода сборки. Основное преимущество метода групповой взаимозаменяемости (МГВ) — обеспечение точности агрегатов без дополнительных доводочных операций. Сборка МГВ является наиболее эффективной в условиях серийного производства с точки зрения снижения затрат (трудоемкости) при изготовлении агрегатов точной механики.

Характерная операция в организации сборки МГВ — сортировка на группы и комплекты, которую в зависимости от критерия оценки сборки (объем незавершенного производства, точность выходных параметров и т.д.), от характеристики сборочных единиц или комплектов (однодетальные, многодетальные и т.д.), можно организовать различными способами.

Выбор того или иного подхода к построению алгоритмов расчета сборки определяется технико-экономическими характеристиками (состав изделия и условия проведения сборки) с рассматриваемым вариантом сборки (рис. 1).

В зависимости от числа видов комплектов, формируемых из заданного набора деталей, можно выделить однокомплектную сборку (две детали), где все получаемые комплекты равноценны, и многокомплектную (свыше двух деталей) сборку. Во втором случае комплекты отличаются по составу или качеству. Сформированный комплект содержит от двух до нескольких деталей и соответственно является двух- или многодетальным.

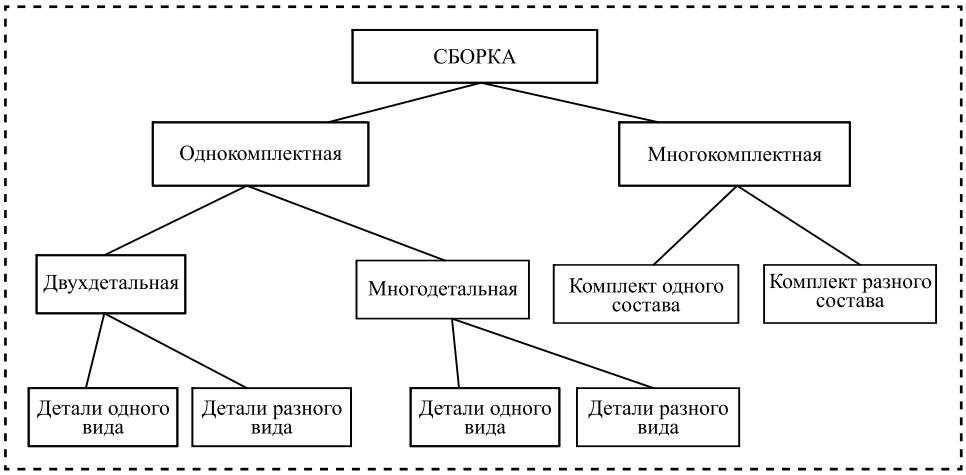


Рис. 1. Классификация основных вариантов сборки по составу выходного продукта

Число деталей в комплекте играет большую роль в выборе содержания формы алгоритма комплектации. Кроме общего числа деталей, входящих в комплект, важным фактором является число видов этих деталей, так как сборка из однотипных деталей имеет свои особенности.

Условия проведения сборки определяются ограничениями, наложенными на параметры комплекта и отдельные его части (рис. 2). Простейшим вариантом является ограничение, заложенное на соединение двух деталей по одному параметру. Оно может быть линейным и нелинейным. Данное ограничение представляет собой частный случай однопараметрического ограничения для комплекта при числе деталей в комплекте, равном двум, и выделено в отдельную группу ввиду его распространенности и особенностей учета. В более сложном случае однопараметрическое ограничение связывает выходной параметр комплекта с параметрами m деталей, входящих в комплект, где $m > 2$.

Многопараметрические ограничения также делятся на ограничения для двух деталей и комплекта ($m > 2$). Первый вариант имеет место при сборке двух деталей по нескольким параметрам. Многопараметрические ограничения для комплекта представляют собой набор взаимосвязанных однопараметрических (многопараметрических) ограничений для двух деталей или комплекс многопараметрических ограничений для двух деталей и однопараметрических ограничений.

Условное обозначение сборки, включающее обозначение состава и ограничений сборки:

$$S\{k = n,\ D = m_1,\ ...,\ m_n \mid A_1,\ ...,\ A_n\}, \qquad (1)$$

где n — число видов комплектов сборки;

m_i — число деталей в комплекте;

A_i — обозначение вида ограничений, наложенных на сборку i-го комплекта.

Обозначения различных видов ограничений:

$О_л$ — однопараметрическое линейное для двух деталей;

$О_н$ — однопараметрическое нелинейное для двух деталей;

$О_к$ — однопараметрическое для комплекта;

$М_д$ — многопараметрическое для двух деталей;

$М_к$ — многопараметрическое для комплекта.

Для уточнения вида $М_к$ можно указывать составляющие его более простые ограничения. Например, обозначение

$$S\{k = 2,\ D = 2_о,\ 3_о|О_л,\ М_к = О_к + \sum О_л\} \qquad (2)$$

описывает сборку, в которой собираются два вида комплектов с числом однотипных деталей в них 2 и 3.

При сборке первого комплекта должно выполняться ограничение, наложенное на соединение деталей, входящих в комплект, второго вида комплектов — не только ограничение на соединение деталей, составляющих размерную цепь друг с другом, но и ограничение, наложенное на соединение всех трех деталей в целом.

Задача комплектации для любого из перечисленных вариантов сборки может выполняться с помощью различных алгоритмов. Выбор наиболее приемлемого алгоритма определяется экономическими характеристиками рассчитанного сборочного процесса.

Одна из важнейших экономических характеристик сборочного процесса — число собранных комплектов. При многокомплектной сборке необходимо учитывать не только число собранных комплектов различного вида, но и сравнительную ценность комплектов. В стоимостном выражении она определяется составом собираемых комплектов или (при одинаковом составе) различием в качестве, например, погрешностью выходного параметра.

При оценке сравнительной эффективности алгоритмов принимаются во внимание такие экономические факторы, как объем

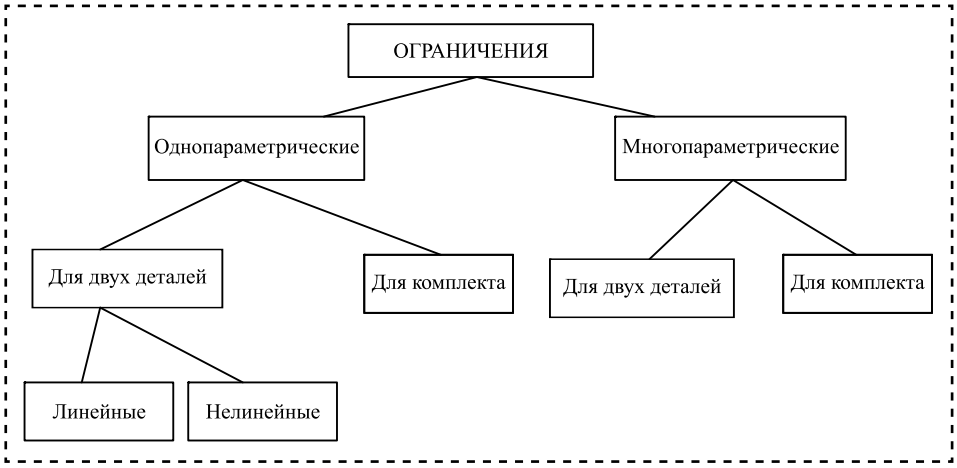


Рис. 2. Основные виды ограничений

дополнительной обработки S, затраты на расчет сборки, сортировку и хранение групп деталей L и др. При выборе алгоритма расчета для исследуемого варианта сборки рассматривают некоторый обобщенный экономический критерий вида

$$Q = f(N_j,\ M_{jk};\ q_j,\quad j = \overline{1,\ n};\quad k = 1,\ l_j,\ S,\ L), \quad (3)$$

где N_j — число комплектов вида;

M_{jk} — число деталей k-го вида в комплекте j-го вида;

l_j — число видов деталей в комплекте j-го вида;

q_j — оценка качества комплектов j-го вида.

В числе дополнительных экономических факторов можно использовать и другие, например, вероятностные характеристики использования несобранного остатка.

Задачу расчета сборки МГВ можно сформулировать следующим образом: при заданных технических характеристиках (составе и ограничениях) сборки обеспечить оптимальные (или, по крайней мере, не меньше заданного) значения критерия Q.

Для упрощения разработки и оценки алгоритмов используют более простые критерии. При этом в качестве критерия оптимальности Q принимают какую-либо из экономических характеристик одного из видов сборки (3) или (2) с введением ограничений на допустимые значения других характеристик. Основой для выбора главной (оптимизируемой) характеристики обычно служат следующие требования [1—4]:

1) одноименные группы содержат равное число деталей, как охватывающих, так и охватываемых (требование отсутствия незавершенного производства);

2) групповой допуск посадки один и тот же для всех групп;

3) средний натяг (зазор) с небольшими отклонениями, одинаковыми для всех групп (требование однородного характера посадки).

Библиографический список

1. **Руднева Л.Ю.** Технология сборки высокоточных электродвигателей с газодинамическими опорами и контактных пластин реле, основанная на принципе равножесткости // III Международный научно-технический семинар "Современные технологии сборки". М.: МАМИ. 2013. С. 94—98.

2. **Руднева Л.Ю.** Повышение технического уровня сборки агрегатов путем типизации операций // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 4. С. 12—14.

3. **Руднева Л.Ю.** Оптимизация качественной оценки агрегатов и приборов при параметрическом и допусковом контроле // Материалы 13-го Международного научно-технического семинара. Киев. 2013. С. 182—186.

4. **Пяткин В.В.** Основные тенденции развития экономики России в современных условиях // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 4 (9). Т. 1. 251 с.

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

УДК 621.7/9

С.Я. Березин, *д-р техн. наук,* **Ю.И. Свиридов**
(Забайкальский государственный университет)
E-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru

Использование концентрированных потоков акустической энергии при сборке резьбовых соединений с радиальным натягом

Рассмотрен опыт применения мощного ультразвука для активации процессов сборки резьбовых соединений с натягом и внутреннего резьбовыдавливания. Представлены конструкции технологической оснастки с фокусирующими и модулирующими узлами для установки на станках сверлильной группы.

The experience to using of high-intensity ultrasound to activate the process of assembly of screw connections with a tightness and internal roll forming thread are considered. Designs of tooling with focusing and modulating units for installation on machines drilling group.

Ключевые слова: резьбовое соединение, сборка, дислокации, напряжения, ультразвук, энергия, крутящий момент, волновод, метчик, модуляция, фокусирование.

Keywords: screw joint, assembly, dislocations, strain, ultrasonic, energy, torque, waveguide, tap, modulation, focusing.

Несмотря на достаточно полное исследование резьбонарезных процессов, интенсифицированных ультразвуком, в настоящее время интерес к данной проблеме не ослабевает. Как в России, так и за рубежом появляются новые работы по данной тематике, исследуются возможности новых схем подведения ультразвуковой (УЗ) энергии к зоне обработки, возможности активации переходов ориентирования и наживления крепежных деталей, эффективность применения УЗ для труднообрабатываемых материалов, возможности использования модулированного УЗ, разрабатываются новые виды и конфигурации волноводов и другие направления. Одним из перспективных методов активизации технологических процессов различного назначения является применение фокусированного УЗ. Способы и теоретические основы фокусирования УЗ-волн исследовали Л.Д. Розенберг, И.Н. Каневский и др. для использования в процессах абразивной обработки, очистки от масел и обезжиривания. Фокусирование УЗ широко используется в медицинской технике, фармакологии и других областях [1, 2].

Эффективность фокусированного УЗ определяется тем, что в зону его воздействия попадает большее количество акустической энергии, которая концентрируется линзой или другой системой. Таким образом, если в зоне обработки выполняется работа A и при этом зона находится в области акустического фокуса, то эффективность можно оценить коэффициентом

$$K_I^{ф} = A/I_{ф}, \quad (1)$$

где $I_{ф}$ — интенсивность УЗ в фокальной области.

Если акустическая система не имеет фокусирующих устройств, то значительная доля энергии УЗ рассеивается, а в зону обработки попадает только незначительная ее часть интенсивностью I. Тогда коэффициент эффективности нефокусированного УЗ находят по формуле

$$K_I = A/I. \quad (2)$$

При этом справедливо условие $K_I > K_I^{ф}$.

На кафедре автоматизации производственных процессов ЗабГУ (г. Чита) разработаны конструкции УЗ технологической оснастки с фокусирующими устройствами, передающими концентрированную акустическую энергию через систему волноводов на метчик или на деталь с отверстием. Волноводы выполнены из материалов с разной плотностью, что позволяет кроме фокусирования получать в зоне обработки сложную интерференционную картину УЗ-колебаний (УЗК), избегая попадания режущих кромок метчика в зону с нулевой пучностью [3].

На рис. 1 представлена конструкция УЗ-головки для нарезания резьбы метчиками или выдавливания раскатниками. Она имеет невращающийся корпус *1* со щеточным токоподводящим устройством *2* и опорами качения *3*, на которых установлена приводная часть с хвостовиком *4*, стаканом *5* и крышкой *6*, на которой внутри стакана закреплен пьезоэлектрический преобразователь *7* с частотопонижающей накладкой *8*, а снаружи крышка *6* выполнена заодно со стержневым концентратором *9*, вокруг основания которого, в крышке *6*, изготовлено сферическое вогнутое углубление *10* для установки в него ответной части фокусирующего концентратора *11*. Стержневой концентратор *9* имеет гнездо *12* для приводной части инструмента *13*, а фокусирующий концентратор *11* заканчивается цангой *14* для зажима стержневой части инструмента.

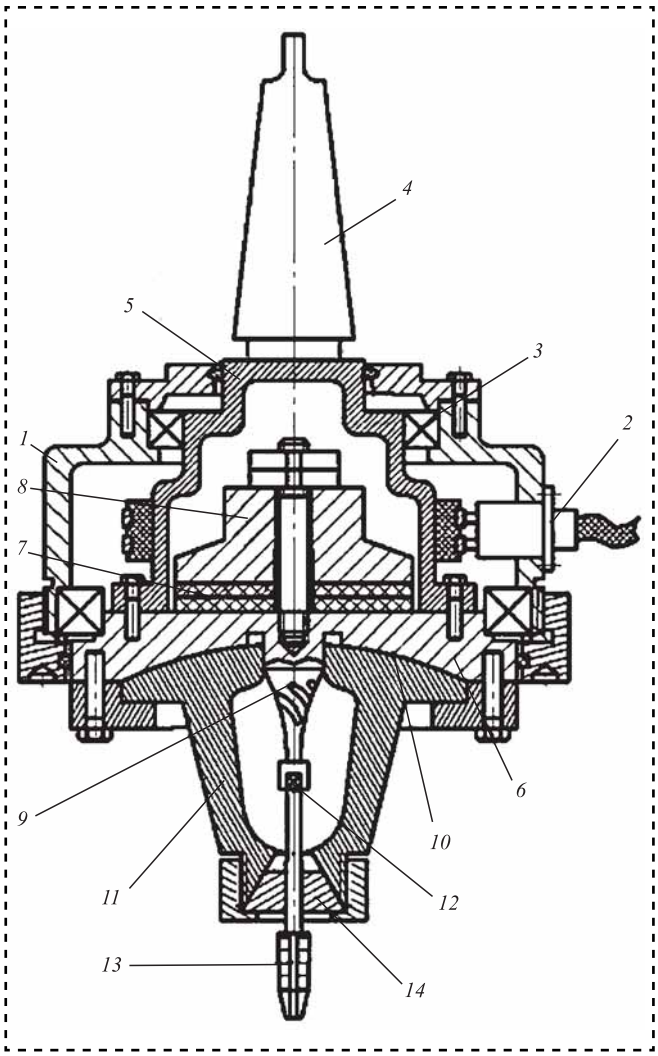


Рис. 1. Ультразвуковая головка с фокусирующей системой

На рис. 2 представлена схема фокусирующей области акустической линзы.

Головка работает следующим образом (см. рис. 1). Пьезоэлектрический преобразователь *7* совместно с частотопонижающим элементом *8* создают УЗК, передаваемые на крышку *9* и фокусирующий концентратор *11*. Наличием винтовых пазов на образующей поверхности концентратора *9* создаются продольно-крутильные колебания, которые передаются через наконечник *12* инструменту *13*. Они снижают силы фрикционного и деформационного характера, возникающие при резьбообразовании. В тяжелых условиях нарезания резьб (резьбы с крупным шагом, обработка вязких материалов, титановых сплавов и т.д.) энергии колебаний, передаваемых только через приводную часть, может оказаться недостаточно для преодоления сил сопротивления и обеспечения стойкости инструмента. Это связано с потерями акустической энергии в контакте инструмента с обрабатываемой деталью

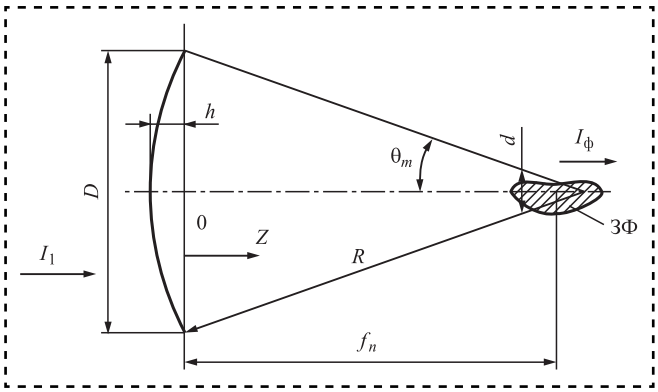


Рис. 2. Схема формирования фокусированного пучка акустической энергии:

D — диаметр фокусирующей области (линзы); *d* — диаметр резьбы; *Z* — осевая координата; *R* — геометрический радиус линзы; *h* — глубина излучателя; θ_m — плоскостный угол раскрытия волнового фронта; ЗФ — зона сфокусированной акустической энергии; f_n — акустическое фокусное расстояние; I_1 — интенсивность УЗК пьезоэлектрического преобразователя; $I_ф$ — интенсивность УЗК в зоне фокуса

за счет поглощения и рассеивания. Чем глубже инструмент входит в отверстие, тем меньше интенсивность колебательной энергии, приходящейся на единицу площади режущей кромки. Фокусирующий концентратор *11* позволяет сконцентрировать большую часть энергии в зоне резьбообразования и удержать ее от рассеивания в объеме обрабатываемой детали. Сфокусированная акустическая энергия передается от линзы *10* и крышки *6* концентратору *11* и цанге *14*, надежно удерживающей стержень инструмента *13*.

Ультразвуковая головка, закрепленная на пиноли станочного шпинделя, имеет выходной конус для крепления вспомогательного инструмента и токоподводящую систему связи с УЗ-генератором.

Применение фокусирующего концентратора ведет к росту интенсивности звуковой волны по мере приближения к акустической фокусной зоне ЗФ (см. рис. 2). Мощность звукового фронта W связана с интенсивностью I ультразвука следующим отношением [2]:

$$I = W / F_2, \tag{3}$$

где F_2 — площадь сечения звукового фронта в сфокусированной области по координате Z, равная

$$F_2 = \frac{\pi D^2}{4}\left(\frac{R - z}{R}\right). \tag{4}$$

Интенсивность в соответствии со значением F_2 будет равна

$$I = \frac{4WR}{\pi D^2 (R - z)}. \tag{5}$$

По мере приближения фокусного расстояния к геометрическому радиусу R интенсивность возрастает.

Наличие фокусирующего концентратора позволяет получать более высокую, по сравнению с прототипом, концентрацию акустической энергии в небольшом объеме. Фокусирование УЗ снижает рассеивание звуковой энергии и обеспечивает перенос максимума интенсивности колебаний в фокальную область, которая, за счет геометрии акустической линзы, направляет сконцентрированную энергию УЗ в зону резьбообразования. Для передачи сфокусированной энергии полый концентратор снабжен цангой, охватывающей стержневую часть инструмента, обеспечивая плотный акустический контакт.

Стержневой концентратор, имеющий винтовые пазы и гнездо для приводной части инструмента обеспечивает передачу крутящего момента с наложенными на него крутильно-осевыми колебаниями с длиной волны, отличной от длины волны колебаний, передаваемых фокусирующим концентратором. Такая схема передачи акустической энергии приводит к появлению в зоне резьбообразования сложной дифракционной картины колебаний от наложения друг на друга двух волн различной длины, но одинаковой частоты. Разные длины стоячих волн определяются различной плотностью материалов обоих концентраторов, а соответственно, и различной скоростью распространения в них УЗК.

Наложение двух стоячих волн различной длины перекрывает узловые точки с нулевой амплитудой, что делает предлагаемую систему независимой от координат их расположения. У прототипа — одна стоячая волна с неустойчивым положением нулевых точек (узлов) в силу зависимости от напряженного состояния элементов звукопередающей системы.

Другое направление применения акустических систем с высокой концентрацией ультразвуковой энергии — установки с комбинированными активаторами. Они представляют собой механические сумматоры энергии различных источников, работающих на разных частотах и мощностях. Это позволяет передавать в общий волновод мощные УЗ, на которые накладываются более слабые, но высокочастотные волны — эффект наложения одних колебаний на другие. Установка включает магнитострикционный преобразователь ПМС 6-22, помещенный внутрь гильзы корпуса динамометра крутящего момента. На конце его волновода закреплен концентратор с тремя пьезоэлектрическими преобразователями П111-0,6-П16, закрепленными под углом 30° на гранях нижнего фланца концентратора. Они равномерно распределены по окружности через угол в 120° (рис. 3, *а* на стр. 2 обложки).

На рис. 3, *б* (на стр. 2 обложки) представлен общий вид экспериментальной установки. На столе сверлильного станка 2А-150 закреплен динамометр крутящего момента с УЗ-преобразователями. На верхнем торце концентратора закреплены тиски, удерживающие образцы, в отверстиях которых накатывается или нарезается резьба. Преобразователь ПМС 6-22 погружен внутрь гильзы динамометра, которая одновременно служит резервуаром для охлаждающей жидкости. Возбуждение преобразователя производит ультразвуковой генератор

ИЛ10-2,0 в диапазоне частот 25...40 кГц. Пьезоэлектрические излучатели П111 подключают к генератору УРСК-7Н-22. Он обеспечивает более высокую частоту УЗК, порядка 5 МГц.

Такая конструкция концентратора УЗК позволяет получать суммированные колебания с общей амплитудой

$$A = \sqrt{\left[A_1 \cos\left(\omega_1 t + \varphi_1\right)\right]^2 + \left[A_2 \cos\left(\omega_2 t + \varphi_2\right)\right]^2 + \left[A_1 \sin\left(\omega_1 t + \varphi_1\right)\right]^2 + \left[A_2 \sin\left(\omega_2 t + \varphi_2\right)\right]^2}, \quad (6)$$

и общей фазой суммарного колебания

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left[\frac{A_1 \sin\left(\omega_1 t + \varphi_1\right) + A_2 \sin\left(\omega_2 t + \varphi_2\right)}{A_1 \cos\left(\omega_1 t + \varphi_1\right) + A_2 \cos\left(\omega_2 t + \varphi_2\right)}\right], \quad (7)$$

где A_1 и A_2 — амплитуды суммируемых колебаний;

ω_1, ω_2 — круговые частоты;

φ_1, φ_2 — частные фазовые сдвиги.

Наложение двух колебаний повышает динамичность процесса деформирования металла. Суммарная амплитуда приводит к росту колебательной скорости УЗК и их интенсивности и звукового давления. Продольные волны УЗК вызывают также появление сдвиговых напряжений в материале. В алюминиевых сплавах, из которых изготовлены образцы с отверстиями под резьбу, уровень данных напряжений может достигать 20...30 МПа. Это значительно больше стартовых напряжений Пайерлса—Набарро для дислокаций, сдвигаемых относительно друг друга в кристаллической структуре решетки.

Можно предположить, что уровень снижения крутящих моментов зависит от физико-механических свойств материала и суммарной колебательной скорости УЗК:

$$\tilde{M}_{\text{кр}} = M_{\text{кр}} - \Delta M, \quad (8)$$

где $\tilde{M}_{\text{кр}}$ — момент при воздействии УЗК;

$M_{\text{кр}}$ — крутящий момент резьбообразования в режиме обычного процесса;

ΔM — снижение крутящего момента от действия концентрированных УЗК.

Величина ΔM зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала и интенсивности УЗК:

$$\Delta M = f\left(C_{\text{м}}\right), \quad (9)$$

где $C_{\text{м}}$ — коэффициент, учитывающий свойства материала.

Функции (9) устанавливаются экспериментально для различных типов резьб и условий сборки или нарезания.

В случаях завинчивания резьбообразующего крепежа или сборки тугих резьб с натягом механизм действия УЗ особенно актуален, так как снижается силовая напряженность процесса, а следовательно, повышается надежность. Исследовать воздействие УЗ на процесс пластического течения металла возможно также измерением микротвердости деформированных зон, регистрацией деформационной составляющей крутящего момента при завинчивании образцов, несущих только заходную часть, применением рентгеноструктурного и микроструктурного анализа [4].

Библиографический список

1. **Физика** и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 2. Источники мощного ультразвука / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1967. 379 с.
2. **Каневский И.Н.** Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. М.: Наука. 1977. 336 с.
3. **Пат. на полезную модель 111790 РФ. МПК B 23 G 1/16.** Устройство для нарезания внутренней резьбы с наложением ультразвуковых колебаний / С.Я. Березин, В.Н. Леонов, И.М. Кулеш. ГОУ ВПО ЗабГУ. Заявка 2011109991/02, заявл. 16.03.2011; опубл. 27.12.2011. Бюл. № 36.
4. **Березин С.Я., Кулеш И.М.** Влияние ультразвука на контактные напряжения деформации материала в процессах сборки соединений с крепежно-резьбообразующими деталями // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 9. С. 13—17.

УДК 620.162

В.В. Есаулов, *канд. техн. наук,* **А.В. Колосков, А.Ю. Шашков, Т.Е. Рожко**
(Филиал ФГУП "Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры" "Научно-исследовательский институт прикладной механики" им. академика В.И. Кузнецова)
E-mail: 073@niipm.ru

Исследование процесса полимеризации компаунда "Герсил-312" в зависимости от концентрации катализатора и влажности окружающей среды

Исследован компаунд "Герсил-312" в части влияния количественного содержания комплексного катализатора в компаунде на его полимеризацию при различных условиях влажности окружающей среды. Выявлены различия в реакционной активности массы силоксановой основы компаунда "Герсил-312" в разных партиях поставки.

Presents the results of a study of the compound "Gersil-312" in part the effect of the value of the quantitative content of the catalyst complex in the compound at its polymerization under various conditions of ambient humidity. Shows the differences in reaction activity of the mass of the siloxane compound of the foundations of "Gersil-312" in different schedule lines.

Ключевые слова: компаунд "Герсил-312", оптоволокно, полимеризация, катализатор.

Keywords: compound "Gersil-312", optical fiber, polymerization, catalyst.

Введение

Компаунд "Герсил-312" применяют для пропитки оптоволокна при намотке катушек чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа (ЧЭ ВОГ) [1]. Активность компонентов компаунда "Герсил-312" может изменяться от партии к партии. Это приводит к изменению процесса полимеризации (вулканизации) компаунда и необходимости определения оптимального процентного содержания катализатора для каждой конкретной партии.

Цель исследований — уточнение особенностей процесса полимеризации образцов компаунда "Герсил-312" марки С в зависимости от концентрации составляющих компонентов и влажности окружающей среды.

Компаунд силиконовый теплопроводный электроизоляционный "Герсил-312" ТУ 2257-007-40233984—2001 [2] с повышенным уровнем теплопроводящих и электроизоляционных свойств разработан в лаборатории ООО НТЛ "Полисил-М" (г. Москва) в 2001 г.

Методика исследований

Для исследования приготовили шестнадцать образцов компаунда "Герсил-312" на чашках Петри с различной концентрацей комплексного катализатора. Использованы компоненты компаунда от четырех поставочных партий 2013—2015 гг. выпуска (условное обозначение в календарном порядке — партия 1, партия 2, партия 3, партия 4) с массовой долей комплексного катализатора — 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 %.

Все образцы (16 шт.) поместили в климатическую камеру типа СН250-С и провели термовлагоиспытания по режиму: сушка при температуре 20...25 °С в течение 72 ч с влажностью в камере 30, 40, 50 и 90 %.

Визуальные наблюдения за процессом отверждения компаунда проводили каждые 24 ч (табл. 1).

Таблица 1

Состояние компаунда "Герсил-312" в процессе полимеризации

<table>
<tr><th rowspan="2">Номер партии</th><th rowspan="2">Время осмотра, ч</th><th colspan="4">Стадии отверждения при влажности, поддерживаемой в камере СН-250-С, %</th></tr>
<tr><th>30</th><th>40</th><th>50</th><th>90</th></tr>
<tr><td colspan="6">Массовая доля катализатора 0,4 %</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1</td><td>24</td><td rowspan="3">Р</td><td rowspan="3">Э</td><td rowspan="9">Ж</td><td rowspan="6">Ж</td></tr>
<tr><td>48</td></tr>
<tr><td>72</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2</td><td>24</td><td rowspan="9">Ж</td><td rowspan="9">Ж</td></tr>
<tr><td>48</td></tr>
<tr><td>72</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td>24</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">МЖ</td></tr>
<tr><td>72</td></tr>
<tr><td rowspan="3">4</td><td>24</td><td rowspan="3">Ж</td></tr>
<tr><td>48</td></tr>
<tr><td>72</td></tr>
<tr><td colspan="6">Массовая доля катализатора 0,6 %</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1</td><td>24</td><td>Р</td><td colspan="2">Э</td><td>ТУ</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">ТУ</td><td colspan="3" rowspan="2">Р</td></tr>
<tr><td>72</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2</td><td>24</td><td colspan="5">Ж</td></tr>
<tr><td>48</td><td>МЖ</td><td rowspan="2">Ж</td><td rowspan="2">МЖ</td><td rowspan="2">Ж</td></tr>
<tr><td>72</td><td>ВТ</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td>24</td><td rowspan="2">МЖ</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td><td>ВТ</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">ВТ</td><td>ВТ</td><td rowspan="2">Э</td></tr>
<tr><td>72</td><td>Р</td><td>Э</td></tr>
<tr><td rowspan="3">4</td><td>24</td><td>МЖ</td><td colspan="2">Ж</td><td rowspan="3">Ж</td></tr>
<tr><td>48</td><td>Э</td><td rowspan="2">ВТ</td><td rowspan="2">МЖ</td></tr>
<tr><td>72</td><td>Р</td></tr>
<tr><td colspan="6">Массовая доля катализатора 0,8 %</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1</td><td>24</td><td rowspan="3">Р</td><td rowspan="2">Р</td><td>Р</td><td rowspan="3">Т</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">Т</td></tr>
<tr><td>72</td><td>Т</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2</td><td>24</td><td>Э</td><td rowspan="2">Э</td><td>Ж</td><td>ЖВ</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">Р</td><td rowspan="2">Э</td><td rowspan="3">Э</td></tr>
<tr><td>72</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td>24</td><td rowspan="3"></td><td>ВТ</td><td rowspan="2">Р</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">ТУ</td><td rowspan="2">Э</td><td rowspan="2">Р</td></tr>
<tr><td>72</td><td>ТУ</td></tr>
<tr><td rowspan="3">4</td><td>24</td><td>Р</td><td>ЖВ</td><td>Э</td><td>Э</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">ТУ</td><td rowspan="2">Э</td><td>Р</td><td rowspan="2">Р</td></tr>
<tr><td>72</td><td>Э</td></tr>
<tr><td colspan="6">Массовая доля катализатора 1,0 %</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1</td><td>24</td><td>Р</td><td rowspan="2">Р</td><td>Р</td><td rowspan="3">Т</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">ТУ</td><td>ТУ</td></tr>
<tr><td>72</td><td>Т</td><td>Т</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2</td><td>24</td><td>Р</td><td rowspan="9">Р</td><td>ВТ</td><td>Э</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">ТУ</td><td rowspan="3">Р</td><td rowspan="2">Р</td></tr>
<tr><td>72</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td>24</td><td>Р</td><td>Э</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">ТУ</td><td>ТУ</td><td rowspan="6">ТУ</td></tr>
<tr><td>72</td><td>Т</td></tr>
<tr><td rowspan="3">4</td><td>24</td><td>Р</td><td>Р</td></tr>
<tr><td>48</td><td rowspan="2">ТУ</td><td rowspan="2">ТУ</td></tr>
<tr><td>72</td><td>Т</td></tr>
</table>

Оценочные критерии состояния компаунда в процессе полимеризации условно определяли стадиями отверждения:

— жидкий (Ж);
— менее жидкий (МЖ);
— жидковязкий (ЖВ);
— вязкотягучий (ВТ)
— эластичный (Э);
— вязкий (В);
— упругий (У);
— резиноподобный (Р);
— твердоупругий (ТУ);
— твердый (Т).

Полимеризация компаунда "Герсил-312" зависит и от концентрации катализатора, и от влажности в климатической камере. Об этом свидетельствуют сравнительные графики состояния исследуемых образцов компаунда (рисунок на стр. 3 обложки). Графики приведены выборочно для влажности 40 и 50 %, наиболее характерной для производственных помещений, в которых осуществляется намотка оптоволокна.

Анализ результатов показал, что компаунд с концентрацией 0,4 и 0,6 % из партий 3 и 4 не полимеризуется даже в течение 72 ч, что определяет его непригодность для использования. Компаунд с концентрацией 1,0 % из тех же партий, наоборот, полимеризуется слишком быстро,

Таблица 2

Состояние компаунда "Герсил-312" в процессе полимеризации в течение рабочей смены

Время сушки, ч	Стадии отверждения партий "Герсил-312" с массовой долей катализатора, %			
	Партия 3		Партия 4	
	0,7	0,8	0,7	0,8
1	Ж	Ж	Ж	Ж
2	Ж	Ж	Ж	Ж
3	Ж	Ж	Ж	Ж
4	Ж	Ж	Ж	Ж
5	Ж	Ж	Ж	Ж
6	Ж	Ж	Ж	Ж
7	Ж	Ж/ВТ	Ж	Ж/ВТ
8	Ж	Ж/ВТ	Ж	Ж/ВТ
9	Ж	ВТ	Ж	ВТ
10	Ж	ВТ	Ж	ВТ
11	Ж/ВТ	ВТ	Ж	ВТ
12	Ж/ВТ	ВТ/Э	Ж/ВТ	ВТ/Э
13	В	Э	В	Э
20	Р	Э/У	В	Э/У

Таблица 3

Состояние компаунда "Герсил-312" в процессе полимеризации при перекрестном тесте

Номер образца	Состав компонентов		Состояние после выдержки в течение, ч		
			24	48	72
1	Паста-компонент 1 (силоксановая основа Герсил-312). Партия 1	Компонент 2 (отвердитель 0,45 %). Партия 1	Э	Р	Р
2	Паста-компонент 1 (силоксановая основа Герсил-312). Партия 1	Компонент 2 (отвердитель 0,45 %). Партия 4	Э	Р	Р
3	Паста-компонент 1 (силоксановая основа Герсил-312). Партия 4	Компонент 2 (отвердитель 0,45 %). Партия 1	Ж	Ж	Ж
4	Паста-компонент 1 (силоксановая основа Герсил-312). Партия 4	Компонент 2 (отвердитель 0,45 %). Партия 4	Ж	Ж	Ж

что не позволяет использовать его в течение рабочей смены.

Время полимеризации образцов из жидкого состояния в вязкотягучее в течение рабочей смены компаунда "Герсил-312" с концентрацией катализатора 0,7 и 0,8 % партий 3 и 4 проверяли в открытых бюксах на воздухе каждый час до момента потери образцами жидкотекучих свойств (табл. 2).

"Герсил-312" с массовой долей катализатора 0,7 % сохраняет жидкое состояние в течение рабочей смены. Следовательно, для исследуемых партий компаунда "Герсил-312" такая концентрация катализатора является оптимальной.

Общий вывод, который следует из проведенных экспериментов, состоит в том, что активность компонентов компаунда меняется от партии к партии.

Для проверки активности силиконовой основы партий компаунда "Герсил-312" выпуска 2013 г. и в 2014—2015 гг. проведен перекрестный тест (табл. 3). Приготовленные одновременно образцы компаунда размещены на стеклянной поверхности чашек Петри. Процесс полимеризации проходил в одинаковых условиях: температура 23...25 °С, влажность 45...55 %. Состояние образцов оценивали визуально. В итоге образцы 1 и 2 одновременно достигли эластичного состояния в течение 24 ч и резиноподобного состояния к 48 ч выдержки, в то время как образцы 3 и 4 оставались в жидком состоянии, как в первоначальном виде, так и после 72 ч выдержки в указанных условиях.

Проведенный тест позволил установить, что имеются различия в реакционной активности массы силоксановой основы компаунда "Герсил-312" (паста-компонент 1). В области "малых" концентраций отвердителя-компонента 2 (0,40...1,0 % мас.) в процессе полимеризации компаунда проявляется различная активность силоксановой основы, что вызывает существенные различия в технологических свойствах разных партий этого материала. Это приводит к необходимости определения оптимального процентного содержания катализатора для каждой текущей партии.

В компаунде "Герсил-312", изготовленном после 2013 г., основной компонент имеет пониженную активность. Это приводит к изменению диапазона концентрации катализатора, обеспечивающего необходимую вязкость компаунда в течение рабочей смены. Указанный диапазон меняется от партии к партии.

Проведенные эксперименты подтвердили выявленную ранее зависимость уменьшения времени полимеризации при повышении концентрации катализатора.

Выводы

Изменение активности основного компонента не влияет на возможность применения компаунда "Герсил-312" для пропитки оптоволокна при намотке катушек чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа.

Для определения необходимой концентрации катализатора компаунда "Герсил-312" требуется разработка специальной методики ее определения.

Библиографический список

1. **Есаулов В.В., Рожко Т.Е., Шашков А.Ю., Картусов С.Н.** Исследование технологических свойств компаунда "Герсил-312" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 2. С. 3—7.

2. **Компаунд** силиконовый теплопроводный электроизоляционный "Герсил-312": ТУ 2257-007-40233984—2001.

УДК 621.893: 678.31

В.А. Кохановский, *д-р техн. наук*
(Ростовский государственный университет путей сообщения),
С.И. Иванов, *канд. техн. наук,* **А.А. Петренко**
(Филиал Донского государственного технического университета, г. Таганрог)
E-mail: petrenko.dstu@mail.ru

Армирующий каркас антифрикционных композитов

Приведены результаты экспериментальных исследований ползучести и износостойкости для выбора состава и композиционной структуры армирующего компонента антифрикционных полимерных покрытий.

Considers the wear and creep properties of different reinforcing fiber carcass for its optimal use when choosing the kind of antifriction polymeric composites coating.

Ключевые слова: антифрикционные полимерные покрытия, ползучесть, износостойкость, композиционная структура.

Keywords: antifriction polymeric cover, creep, wear, fiber carcass.

Полимерные антифрикционные композиционные покрытия широко используют в тяжелонагруженных относительно низкоскоростных трибосистемах [1, 2]. Они состоят из фторопластовых нитей "полифен", выполняющих антифрикционную функцию, нитей с более высокими адгезионными и прочностными свойствами и фенольного связующего [3], объединяющего компоненты в единый материал и обеспечивающего фиксацию покрытия на субстрате [3, 4].

Рабочий зазор в подшипнике, определяющий ресурс металлополимерного трибосопряжения, образуется в результате параллельного действия двух процессов: изнашивания и вязкоупругой деформации — ползучести [5, 6]. Оба процесса, ответственных за увеличение зазора интенсифицируются температурой, генерируемой в процессе трения. С ростом температуры ползучесть полимеров увеличивается за счет снижения жесткости [7, 8], а изнашивание — в результате потери прочности [8, 9].

Применение различных армирующих каркасов меняет толщину покрытия, вклад деформации композита в формирование зазора и ресурс металлополимерной трибосистемы.

Проведена экспериментальная оценка влияния структуры и состава армирующего компонента антифрикционного полимерного композита на эволюцию зазора трибосопряжений с покрытиями из этого материала. Композиционная структура покрытий определяется типом переплетения антифрикционных и прочных нитей в его каркасе — функциональным и армирующим компонентом (рис. 1). Все типы карка-

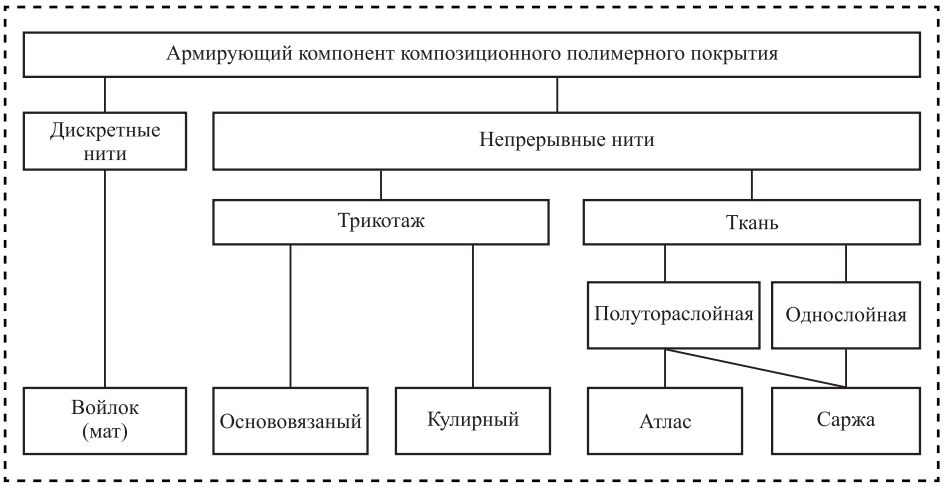


Рис. 1. Композиционная структура антифрикционных покрытий

сов содержат фторопластовые нити "полифен" с практически полным отсутствием адгезии к матричному связующему и относительно низкой прочностью. Это вызывает необходимость их совмещения с другими нитями, обладающими более высокими адгезионными свойствами.

В войлоке это достигается перемешиванием коротких обрезков нитей, использованием технологических связующих или периодической прострочкой материала. Это наиболее дешевый, но и наименее износостойкий материал.

Производство трикотажных материалов экономичнее ткацкого. Способность трикотажа растягиваться дает ему существенные преимущества при нанесении покрытий на поверхности значительной кривизны. Основовязаный трикотаж позволяет выводить на рабочую поверхность покрытий значительное число фторопластовых нитей и не уступает по износостойкости тканям [11]. Однако рыхлая структура трикотажа способствует образованию пор и несплошностей при нанесении покрытий, что резко увеличивает податливость последних.

Тканые материалы в отечественной промышленности используют наиболее широко. Применяют полутораслойные двухуточные ткани атласного и саржевого переплетения, а также однослойные саржи. Полутораслойный шестиремизный неправильный атлас имеет на рабочей поверхности 100 % фторопластовых нитей и почти столько же прочных нитей на изнанке. Это достигается тем, что основа и 1-й уток фторопластовые, а 2-й уток — из прочных нитей. У полутораслойной саржи 1/3 на рабочую поверхность из фторопластовых нитей выведена сетка с шагом около 6 мм из прочных нитей, что увеличивает объем матричного связующего. Однослойную саржу 1/1 (полотно) изготовляют из комплексных нитей, совмещая скруткой фторопластовые и прочные нити.

Фторопластовые нити выполняют антифрикционные функции покрытий, а входящие в состав композита прочные нити определяют его работоспособность, т.е. адгезионные свойства покрытий. Имея адгезию к матричному связующему, прочные нити влияют на деформационные параметры покрытий.

В качестве критерия выбора материала прочных нитей принимали теплостойкость и деформацию ползучести препрега композита на основе ткани атласного плетения с прочными нитями разных марок. Исследование препрега с неотвержденным связующим, а не готового композита, объясняется необходимостью увеличить при экспериментах степень различия в величинах деформации для нитей разной химической природы. Результаты экспериментальных исследований описаны наследственной моделью "типичного твердого тела" [6, 9], полученной на основе уравнения Больцмана—Вольтерра (табл. 1):

Таблица 1

Влияние типа прочных нитей на ползучесть препрега (σ = 2 МПа, T = 22 °С)

Тип нитей	Параметры модели		
	E_0	E_∞	τ
Аримид Т	13,70	8,31	15,61
Лавсан	14,09	8,56	11,16
Вискоза	12,41	7,62	13,76
СВМ	13,05	9,06	16,07
Среднее	13,31	8,39	14,15
Погрешность, %	5,9	7,9	11,9
Примечание. Средняя деформация ε = 0,24.			

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{E_\infty} - \frac{\sigma}{E_0}\right)\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),$$

где σ — сжимающие напряжения, МПа;

t — время, мин;

E_0, E_∞ — мгновенный и равновесный модули, МПа;

τ — постоянная времени ползучести, мин.

Различие деформационных констант не превышает экспериментальной погрешности, т.е. все исследованные полимеры могут быть использованы. Области их индивидуальной применимости определяются экономичностью и теплостойкостью.

Подбор компонентов полимерного композита целесообразно выполнять с учетом близости тех свойств, которые ограничивают область их применимости. У полимерных материалов это допустимая температура эксплуатации. Преимущество среди исследованных материалов имеют полиимидные волокна "Аримид Т". В этом случае композит (фторопластовые нити — 275 °С, полиимидные нити — 300 °С и фенольная матрица — 250...300 °С) обладает практически равной термостойкостью.

Критерием армирующего компонента композита количественного состава считаем ресурс

покрытия на основе однослойной саржи 1/1 и атласа той же толщины при средних нагрузочно-скоростных режимах (σ = 13 МПа, v = 0,214 м/с).

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд заключений:

— используемые в качестве прочных полиимидные нити имеют очень низкие антифрикционные свойства;

— на необходимое для обеспечения ресурса трибосистемы число фторопластовых нитей на контактной поверхности влияет тип плетения ткани;

— высокоресурсные покрытия рассматриваемого класса могут быть получены на основе тканых каркасов различного переплетения.

Физический смысл результатов объясняется адгезионным характером изнашивания фторопласта [12]. При выводе на рабочую поверхность трибосистемы 100 % фторопласта он вначале переносится на ответную деталь, а затем уносится из зоны трения (рис. 2 толщины покрытий 5 и 6 на основе атласа). Если на рабочую поверхность выводится некоторая часть прочных нитей, покрытых из-за хорошей адгезии матричным связующим, фторопластовые нити располагаются в прочной капсуле, стенки которой затрудняют его перенос. В процессе изнашивания капсулы фторопласт смазывает, но не переносится на ответную деталь большими фрагментами (см. рис. 2, процент фторопласта в покрытиях 2, 3, 4 на основе саржи 1/1).

Ресурс армирующего компонента покрытий зависит от контактного зазора пары трения,

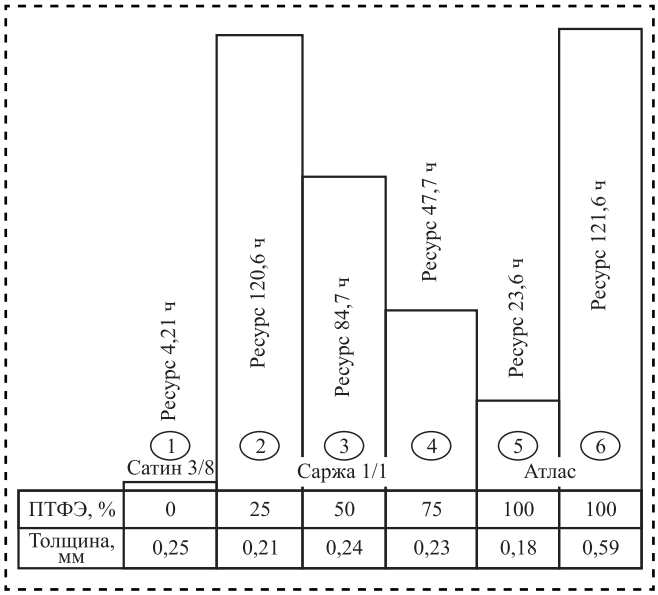


Рис. 2. Зависимость ресурса покрытия от соотношения компонентов в его каркасе

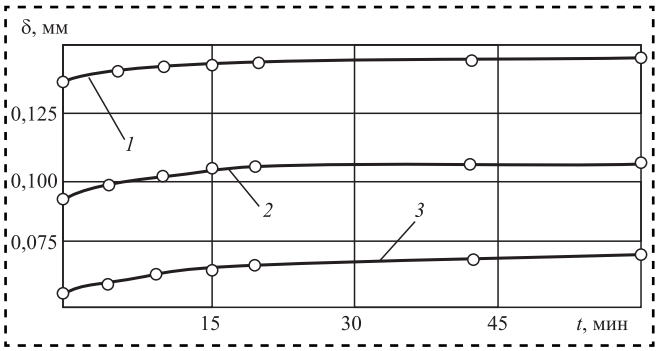


Рис. 3. Деформация ползучести покрытий на основе нетканого материала (*1*), основовязаного трикотажа (*2*) и атласной ткани (*3*)

Таблица 2

Вязкоупругие свойства композиционных покрытий

Каркас	Толщина, мм	Упругая деформация, мм	Полная деформация, %	E_0, МПа	E_∞, МПа
Войлок	1,03	0,143	14,3	35,98	35,11
Трикотаж	0,46	0,097	22,4	23,72	22,31
Ткань	0,55	0,062	12,5	44,06	39,89

который определяется двумя параллельно идущими процессами: вязкоупругой деформацией (ползучестью) и изнашиванием.

Антифрикционные покрытия на основе наиболее экономичного нетканого каркаса (отходы прядильного и ткацкого производств), в связи со значительной податливостью, используют для слабонагруженных неответственных трибосистем, требующих демпфирования (рис. 3, табл. 2).

Покрытия на основе трикотажных каркасов, благодаря эластичности петельных структур, применяют для трибосистем с фасонными контактными поверхностями значительной кривизны.

Покрытия на основе тканых каркасов являются наиболее жесткими с минимальным вкладом вязкоупругой деформации в величину рабочего зазора и применяются в трибосистемах с ограниченным свободным ходом.

Жесткость исследуемых покрытий оказывает сильное влияние на каркас композита, а матричное связующее в средней степени влияет на продолжительность процесса ползучести, хотя и сильнее, чем каркас (табл. 3).

Таблица 3

Влияние основных компонентов покрытия на его вязкоупругие характеристики

Параметр		Коэффициент корреляции	Достоверность, %	Характер связи
Равновесный модуль E_∞	Матрица	0,471	57	Прямая сильная
	Толщина ткани	0,837	92	
	Толщина покрытия	0,967	99	
Постоянная времени ползучести τ	Матрица	−0,703	82	Обратная средняя
	Толщина ткани	−0,445	56	
	Толщина покрытия	−0,472	58	

Выводы

Экспериментально установлены основные закономерности влияния состава и структуры армирующего каркаса полимерных композиционных антифрикционных покрытий на их вязкоупругие характеристики; определен вклад вязкоупругой деформации в формирование рабочего зазора металлополимерного трибосопряжения и выявлены области рационального применения антифрикционных покрытий рассматриваемого класса с различным составом и композиционной структурой.

Библиографический список

1. **Ina Elges.** Gelenklager, Gelenkkopfe: Maβ katalog K227D // Ausgable. 1980. 103 s.
2. **Колесников В.И., Сычев А.П., Кравченко В.Н., Флек Б.М.** Композиционные материалы для узлов трения подвижного состава на основе технических тканей и их триботехнических характеристик: труды южного научного центра Российской академии наук. Том II. Физика. Механика. Техника. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦРАН, 2007. С. 9—20.
3. **Кохановский В.А.** Матричные материалы антифрикционных композитов // Вестник ДГТУ, 2001. № 2 (8). С. 51—56.
4. **Кохановский В.А., Бородин Е.А.** Формирование антифрикционного композиционного покрытия // Вестник ДГТУ, 2001. Т. 1. № 3 (9). С. 155—159.
5. **Pramanick A., Sain M.** Nonlinear Viscoelastic Creep Prediction of HDPE-Agro-fiber Composites // Journal of Composite Materials. 2006. Vol. 40. P. 417—431.
6. **Кохановский В.А.** Износостойкость металлополимерных трибосистем // Пластические массы. 1997. № 6. С. 28—32.
7. **Yasushi Miyano, Masayuki Nakada, Hongneng Cai.** Formulation of Long-term Creep and Fatigue Strengths of Polymer Composites Based on Accelerated Testing Methodology // Journal of Composite Materials. 2008. Vol. 42. P. 1897—1919.
8. **Кохановский В.А., Мукутадзе М.А.** Теплофизические свойства полимерных антифрикционных покрытий и режимы их нанесения // Пластические массы. 2002. № 12. С. 44—45.
9. **Латишенко В.А.** Диагностика жесткости и прочности материалов. Рига: Зинатне, 1968. 320 с.
10. **Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А.** Сопротивление полимерных и композиционных материалов. Рига: Зинатне, 1980. 571 с.
11. **Кужаров А.С., Рядченко В.Г.** Композиционные антифрикционные покрытия на основе волокон политетрафторэтилена // Безызносность: межвуз. сб. науч. тр. Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1992. Вып. 2: С. 149—147.
12. **Трение** и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый и др. Минск: Наука и техника, 1976. 431 с.

УДК 621.382.2

В.В. Жуков, *канд. техн. наук,* **С.А. Степанов, С.П. Бычков, В.Т. Рябов,** *канд. техн. наук*
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)
E-mail: zhukov-vv@yandex.ru

Разработка системы регенерации абразивного материала для установок резки маскированных кремниевых пластин

Рассмотрены пескоструйные установки, оснащенные автоматическими системами сбора и рециркуляции абразивного материала. Абразивный материал извлекается из воздушно-абразивной смеси, поступающей во внешнюю вытяжную вентиляцию из установки, и, при необходимости, возвращается в бункер рабочей камеры для повторного использования. Основным устройством системы являются рекуператоры, которые выбирают исходя из расхода сжатого воздуха через установку и зернистости абразивного материала. Показано, что требуются локализованные системы сбора и рециркуляции абразивного материала, рассчитанные на зернистость абразива менее 42 мкм при пропускной способности системы по воздуху не менее 3000 л/мин. Область применения такой системы — пескоструйные установки в производстве электронных компонентов для полупроводниковых приборов; резка маскированных полупроводниковых подложек на круглые диски (кристаллы) и пластин из приборной керамики для изготовления конденсаторов.

Shows sand-blasting machine, equipped with automatic systems of abrasive material collection and recuperation. The abrasive is removed from the air-abrasive mixture flowing in the external exhaust ventilation from the cabin, and, if necessary, is returned to the hopper for reuse. The main unit of the system are the recuperators, which are selected based on the flow of compressed air through the machine and abrasive material granularity. Also shown to require local system of collection and recycling of abrasive material, designed for the particle size of the abrasive is not more than 42 μm in system bandwidth over the air not less than 3000 l/min. Such system field of application is operating sandblasting machines for the electronic components production for semiconductor devices, in particular, the machines used for cutting masked semiconductor plates on circular discs (crystals) and cutting instrument ceramic for making capacitors.

Ключевые слова: пескоструйная обработка, абразивный материал, пескоструйная установка, рекуператор, центробежный циклон, струйно-инжекционное сопло, пневмовихревой привод вращения, пневмовибратор.

Keywords: sandblasting, abrasive material, sandblasting machine, recuperator, centrifugal cyclone, jet-injection nozzle, pneumovirinae rotary drive, pneumatic vibrator.

В отрасли, обеспечивающей элементную базу приборостроения, пескоструйную обработку традиционно относят к технологическим процессам, несущим потенциальную угрозу загрязнения производственным помещениям с повышенными требованиями к вакуумной гигиене.

Пескоструйная технология загрязняет окружающую среду через обрабатываемые изделия и систему вентиляции из-за их контакта с сыпучими абразивными материалами. Косвенные затраты на организацию производственного участка пескоструйной обработки весьма велики по отношению к стоимости пескоструйного оборудования — требуется высокопроизводительная компрессорная станция и удаленное от основного производства помещение с автономной системой приточно-вытяжной вентиляции, имеющей выход на промежуточные и конечные модули фильтрации запыленного воздуха. Эксплуатационные расходы по участку немалые из-за высокой стоимости расходных материалов, в том числе мелкодисперсного абразивного порошка и быстро изнашивающихся насадок к рабочим соплам, а также высокого потребления основного энергоносителя — сжатого воздуха.

Указанные негативные факторы отходят на второй план в тех случаях, когда пескоструйную

технологию применяют в основном производстве на безальтернативной основе и ее нельзя заменить другим столь же эффективным способом обработки. К числу таких процессов относится производство дисков-кристаллов для полупроводниковых диодов пятого поколения, собираемых по классической схеме.

Для изготовления дисков-кристаллов используют стандартную, металлизированную алюминием кремниевую пластину с непланарной полупроводниковой структурой, которую маскируют набором круглых защитных дисков. Пескоструйная обработка локализуется в зазорах между защитными дисками и обеспечивает удаление кремния на глубину, соответствующую толщине пластины [1].

За счет движения рабочих сопел и кассеты с обрабатываемыми пластинами пескоструйная обработка ведется по всей поверхности маскированной пластины последовательно несколькими струйно-инжекционными соплами (для исключения перегрева пластин в процессе пескоструйной резки). В результате групповой обработки достигается разделение исходной пластины с номинальным диаметром 80 мм на большое число дисков-кристаллов (свыше 1000 дисков при диаметре одного диска 1,5 мм) с минимальным отклонением от размеров защитных дисков.

Технология пескоструйной резки маскированных полупроводниковых подложек разработана голландской фирмой "Филлипс" в конце прошлого века. Одно из ведущих предприятий этой фирмы специализировалось на выпуске полупроводниковых диодов и обеспечивало выпуск до 10 млн диодов в месяц. В настоящее время производственные мощности данного предприятия принадлежат Китаю, который восстановил выпуск аналогичной продукции в количестве 4...5 млн шт. в месяц.

В РФ освоено производство современных диодов при технической поддержке фирмы "Филлипс". Однако ряд технологий, связанных с резкой полупроводниковых подложек на диски-кристаллы, не были доступны, и поставляли этот компонент из Голландии. В соответствии с отраслевой программой по импортозамещению при участии МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана и запущена в производство технологическая линия по изготовлению дисков-кристаллов из полупроводниковых подложек на кремниевой основе.

В голландской технологии пескоструйной резки маскированных пластин изначально закладывалось однократное использование абразивного материала с частичным его осаждением внутри рабочей камеры увеличенного объема для повторного использования [2]. Однако большая часть абразивного материала выносилась из рабочей камеры потоком воздуха и осаждалась на конечных фильтрах системы принудительной вентиляции вместе с отходами от обработки, что исключало его повторное использование. Расход абразивного материала (электрокорунда зернистостью 28...36 мкм), на данной установке составлял до 50 л абразивного порошка в смену при стоимости одного литра порошка 85...100 руб.

Для снижения затрат по расходным материалам отечественному предприятию требовалась система сбора и рециркуляции абразивного материала, рассчитанная на зернистость абразивных частиц менее 42 мкм и пропускную способность по воздуху до 3000...3500 л/мин с учетом выноса абразивного материала из установки вместе с воздушным потоком не менее 0,5 л/мин. На момент разработки такой системы отсутствовали какие-либо готовые технические решения и аналоги.

Современные аналоги данного оборудования — это локализованные системы сбора и рециркуляции абразивного материала, которые ориентированы на использование с серийно выпускаемыми малорасходными пескоструйными камерами проходного типа для обработки изделий из листового стекла. Эти системы рассчитаны на расход воздуха до 800 л/мин и зернистость абразивного материала — 60...100 мкм (рис. 1 на стр. 2 обложки) [3].

Принцип работы системы рециркуляции основан на центробежной сепарации абразивного материала из потока воздуха. В центробежных циклонах возможно осаждение микродисперсных абразивных частиц с минимальными размерами 20...25 мкм при эффективности осаждения до 80 % от общего числа частиц, попадающих в циклон с потоком воздуха [4]. Указанный нижний предел для размеров осажденных с помощью циклона частиц незначительно превышает зернистость абразивного материала (28...42 мкм), который используется в отечественных пескоструйных установках резки маскированных кремниевых пластин. Эффективность осаждения мелкодисперсного абразивного порошка в серийно изготавливаемых циклонах с повышенной пропускной способностью не более 80 % недостаточна.

Тестовые испытания такого циклона подтвердили его характеристику по паспортным данным и показали, что необходимо учитывать свойства сепарируемого из потока воздуха пылевидного материала. Осажденный центробежным циклоном абразив частично удерживался в его нижней конусной поверхности из-за налипания микроабразивных

частиц на стенки циклона. Скопление абразивного материала внутри циклона обусловлено наличием в сепарируемой воздушно-абразивной смеси микрочастиц кремния (отходы обработки), несущих электростатический заряд, который при их торможении переносился на корпус циклона и способствовал удержанию частиц абразивного материала и кремния на металлических стенках циклона. Поэтому необходимы дополнительные технические приемы и средства для отвода осажденного абразива из циклона, основанные на использовании высокочастотной вибрации и нейтрализации электростатического заряда.

Разработку конструкции рекуператора и системы в целом проводили на основе структурного анализа известных технических решений, а также с учетом технологических факторов, влияющих на процесс сепарации абразивного материала внутри центробежного циклона.

Технические изменения базового образца циклона, влияющие на качество сепарации:

— подавление турбулентности потока запыленного воздуха внутри циклона за счет выравнивания по сечению его скорости на входе в циклон (изменение профиля воздушного канала, соединяющего циклон с пескоструйной камерой, из круглого в щелевой с тем же проходным сечением);

— подбор оптимальной скорости сепарируемого воздушно-абразивного потока внутри циклона регулятором расхода откачиваемого из циклона воздуха;

— увеличение активной поверхности циклона, контактирующей с потоком абразивных частиц (установка внутри циклона между его входным и выходным воздушным патрубками отражателя в форме спирали);

— создание зоны разряжения воздуха внутри полости циклона, выделенной для сбора осажденного абразивного материала (струйно-инжекционный насос, соединенный с накопительной емкостью, обеспечивает перекачку абразивного материала из циклона в бункер пескоструйной установки);

— использование вибрации стенок циклона для равномерной подачи осажденного абразивного материала к устройству его перекачки в бункер установки (пневматический вибратор и механический ворошитель осажденного абразива, связанные с накопительной емкостью).

Технологические факторы:

— сушка абразивного материала в процессе его использования с целью удаления из него адсорбированной из воздуха влаги (встроенный в бункер пескоструйной установки нагреватель (ТЭН) для сушки в течение 2...4 ч при температуре не ниже 60 °С);

— контроль гранулометрического состава абразивного материала, указывающий на число абразивных частиц с заявленной зернистостью; в электрокорунде марки С-80 с паспортной характеристикой абразива по зернистости — 28...36 мкм выявлено только 85 % абразивных частиц в данном интервале, остальные — менее 20 мкм.

Комплекс технических решений реализован в макетном образце разрабатываемого рекуператора. Его отличительная особенность — модульная схема построения, при которой модер-

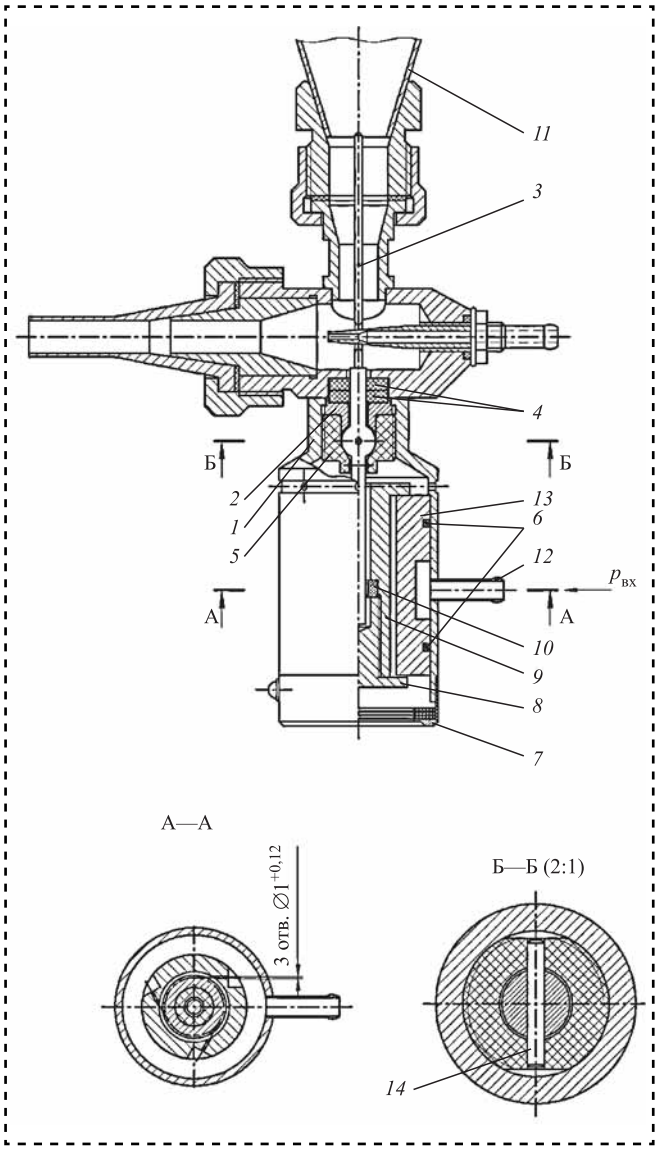


Рис. 2. Устройство для перекачки абразивного материала: *1* — корпус пневмовихревого привода; *2* — втулка-фиксатор шарнира; *3* — ворошитель; *4* —шайбы; *5* — стопорная гайка; *6* — уплотнительные кольца; *7* — сетчатая заглушка; *8*, *9* — ротор привода в сборе; *10* — упругая вставка; *11* — конус накопительной полости, соединенный с циклоном (не показан); *12* — штуцер подвода сжатого воздуха к приводу; *13* — статор привода; *14* — штифт крепления шарнира

низированный циклон соединяли при помощи разъема с модульным устройством перекачки абразивного материала. Этот модуль присоединялся к накопительной емкости циклона и состоял из струйно-инжекционного насоса, пневматического вибратора и механического ворошителя осажденного абразива.

На рис. 2 представлена конструктивная схема устройства для перекачки абразивного материала.

Модульная конструкция разработана с использованием пневмовихревого привода вращения [5], обладающего рядом полезных для решаемой задачи свойств: вращающийся в высокоскоростном закрученном потоке сжатого воздуха дисбалансный ротор *9*, может быть использован одновременно в качестве привода механического ворошителя *3* абразивного материала и источника высокочастотной вибрации.

Оптимальные режимы функционирования выявляли на специальном испытательном стенде имитирующем работу рекуператора совместно с пескоструйной установкой резки (рис. 3 на стр. 2 обл.) использовали методы параметрического анализа технических объектов [6], основанные на последовательном определении экстремальных значений целевой функции при варьировании внутренних параметров каждого из устройств, входящих в объект.

Целевая функция (критерий оптимальности) для рекуператора формулировалась как обеспечение сепарации и возврата абразивного материала в бункер пескоструйной установки в весовом количестве не менее 95 % от исходного абразивного материала на входе циклона.

Результаты исследований целевых устройств с целью выявления оптимальных режимов их функционирования по заявленному показателю эффективности приведены на рис. 4.

В качестве показателя эффективности для струйно-инжекционного насоса использовали значение разряжения в условно закрытой накопительной емкости при различных значениях

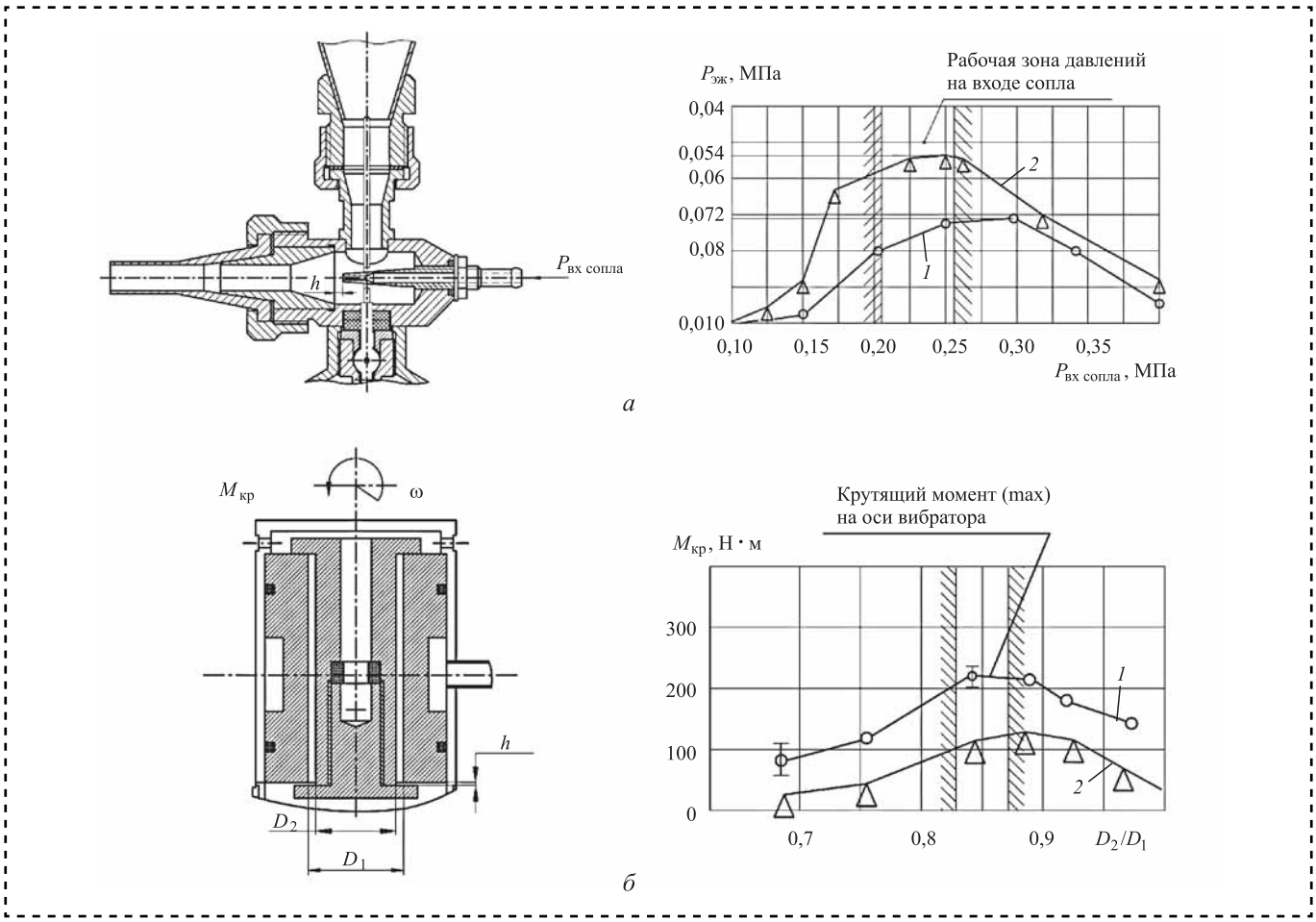


Рис. 4. Влияние внутренних параметров устройств на их робоспособность:
а — влияние входного давления $P_{вх}$ и положения *h* центрального штуцера на давление разряжения внутри струйно-инжекционного насоса: *1* — при *h* = 4 мм; *2* — при *h* = ± 1 мм; *б* — зависимость крутящего момента пневмовибратора от соотношения конструктивных размеров его статора и ротора: *1* — при *h* = 0,9 мм; *2* — при *h* = 2 мм

давления сжатого воздуха на входе насоса. Оптимальное давление разряжения 0,05...0,06 МПа достигали при давлении 0,20 МПа на входе насоса.

Показатель эффективности работы пневматического вибратора оценивали по величине крутящего момента, передаваемого тяге ворошителя от дисбалансного ротора. Максимальный крутящий момент на оси ротора достигается при соотношении диаметров ротора и статора пневмовихревого привода 0,85, и торцевом зазоре между фланцем ротора и корпусом статора 0,9 мм. Давление сжатого воздуха на входе пневматического вибратора — не более 0,15 МПа. Диапазон частот и амплитуд вибрации дисбалансного ротора составил не менее 10 кГц при амплитуде до 0,15 мм.

Конструктивные изменения центробежного циклона, связанные с профилированием его входного канала и разделением зоны осаждения абразива внутри циклона спиральным отражателем, повысили эффективность сепарации на 14...18 %.

Проведенные исследования системы сбора и рециркуляции абразивного материала позволили модернизировать действующую на предприятии отрасли установку резки маскированных полупроводниковых подложек.

На рис. 5 (на стр. 2 обложки) показан общий вид системы сбора и рециркуляции абразивного материла пескоструйной установки резки маскированных полупроводниковых подложек.

Заключение

В результате промышленной эксплуатации разработанного рекуператора, локализованного с действующей пескоструйной установкой резки, получено:

— снижение расхода и потерь абразивного материала не менее чем в 1,5 раза, при этом массовая доля осажденного рекуператором абразивного материала по отношению к попавшему в циклон с воздушным потоком абразиву составила 94 ± 2 %;

— увеличение срока использования абразивного порошка до 12...15 рабочих смен в действующей установке (без его замены из-за загрязнений, дробления и потери режущих свойств частицами) вследствие поддержания гранулометрического состава и зернистости абразивного материла на одном уровне.

Подтвержденный экономический эффект от использования системы сбора и рекуперации абразивного материала составил 170 тыс. руб. в год.

Библиографический список

1. **Жуков В.В., Дощечкин Е.Д.** Технология изготовления полимерных маскирующих покрытий с использованием клеевых соединений при пескоструйной резке полупроводниковых материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2005. № 10. С. 20—23.

2. **Жуков В.В., Степанов С.А.** Универсальная камера для обработки маскированных поверхностей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 5. С. 11—16.

3. **Расчет** и проектирование сухих пылеуловителей и туманоуловителей / под ред. С.В. Белова. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1985. 225 с.

4. **Тарасенко А.П., Коноплин А.Н.** Новый центробежный сепаратор с коническими рабочими органами // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. № 12. С. 6—10.

5. **А. с. 844198 RU, МКИ^3 В 23 Р 19/06.** Пневмовихревой привод вращения / Л.И. Волчкевич, В.З. Фадеев, В.В. Жуков. Открытия. Изобретения. 1981. № 25.

6. **Норенков И.П.** Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 360 с.

УДК 531.43

И.В. Добров, *д-р техн. наук*
(Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск)
E-mail: igordobrov@yahoo.com

К вопросу теории механики процесса внешнего трения скольжения твердых тел по горизонтальной плоскости (часть 1)

При решении задач механики взаимодействия твердых тел с плоской горизонтальной поверхностью контакта установлена взаимосвязь законов сухого трения, при которых сила трения определяется одной или двумя составляющими силы сопротивления относительному скольжению тел пары трения.

In solving the problems of the mechanics of interaction of solids with a flat horizontal surface of contact, relationship established laws of dry friction, in which the friction force is determined by one or two components of the resistance force to the relative sliding of the bodies of the friction pair.

Ключевые слова: внешнее трение, трение скольжения, сухое трение, сила трения скольжения, поступательная пара трения, приведенная сила трения, приведенный коэффициент трения.

Keywords: external friction, sliding friction, dry friction, sliding friction force, applied mechanics, translational friction pair, given the force of friction, reduced coefficient of friction.

Процесс и явление не существуют друг без друга, но развиваются по своим законам. Процесс порождает явление. Явление появляется в процессе. Их взаимосвязь определяет наука.

Механика внешнего трения — процесс контактного взаимодействия двух тел независимо от их агрегатного состояния [1, 2]. Одной из основных величин, характеризующих процесс трения, является сила трения [3—6]:

$$P_{\text{тр}} = \begin{cases} T_{12} = -fN_{12}\dfrac{\mathrm{v}_{12}}{\mathrm{v}_1} = -F_1 \ \text{ при } \ |\mathrm{v}_1| > |\mathrm{v}_2| \geqslant 0; \\ T_{12} = -T_{21}; \\ T_{12}^{(\text{п})} = -f^{(\text{п})}N_{12} = -P_1^{(\text{п})} \ \text{ при } \ \mathrm{v}_1 = \mathrm{v}_2 \geqslant 0\ ; \\ T_{12}^{(\text{п})} = -T_{12}^{(\text{п})}, \end{cases} \qquad (1)$$

где T_{12} — сила трения скольжения при скольжении ведущего тела 1 относительно ведомого ($\mathrm{v}_2 \neq 0$) тела 2 (или опоры 2 при $\mathrm{v}_2 = 0$) со скоростью $\mathrm{v}_{12} = \mathrm{v}_1 - \mathrm{v}_2$;

f — коэффициент трения скольжения — коэффициент пропорциональности между силой трения скольжения и нормальной силой N_{12}, обеспечивающей возможность контакта тел пары трения под действием внешней силы $P_1 = -N_{12}$, прижимающей тело 1 к телу 2;

F_1 — внешняя сила движения, действующая на ведущее тело 1, в направлении скорости v_1 параллельно поверхности трения;

$f^{(\text{п})}$ — коэффициент трения покоя — коэффициент пропорциональности $\left(0 < f^{(\text{п})} \leqslant f\right)$ между силой трения покоя $T_{12}^{(\text{п})}$ и нормальной силой N_{12}, когда на тело 1 (неподвижное относительно тела 2) действует внешняя сила $0 < P_1^{(\text{п})} \leqslant F_1$ параллельно поверхности трения при микросмещении тел без их макросмещения [1, 2].

Нижний цифровой индекс в обозначении сил, состоящий из одной цифры, указывает на номер тела, на которое действует сила. Индекс, состоящий из двух последовательно расположенных цифр, указывает: первая цифра — номер тела, на которое действует сила, вторая — номер тела, со стороны которого действует сила. Цифры индекса, разделенные знаком (–), определяют

внутреннюю силу, действующую между телами, обозначенными цифрами индекса.

Согласно закону сухого трения твердых тел Амонтона—Кулона [5] *, сила трения прямопропорциональна нормальной силе, прижимающей тела пары трения друг к другу,

$$T_{12} = fN_{12} \text{ при } f = \text{const}, \tag{2}$$

а двучленному закону Кулона [3, 4] — сила трения пропорциональна нормальной силе, прижимающей тела пары трения

$$T_{12} = A + BN_{12} \text{ при } f = \frac{A}{N_{12}} + B, \tag{3}$$

где A и B — коэффициенты, учитывающие характеристику "сцепляемости" двух тел и приложенную нагрузку.

До настоящего времени область применения каждого из этих законов с позиции инженера-механика, которого в первую очередь интересует энергосиловые параметры процесса трения, не имеет достаточного теоретического обоснования.

Цель работы — определение общих закономерностей и характерных отличий процессов сухого трения (2) и (3) с использованием методов прикладной механики при безусловном соблюдении законов Ньютона и закона сохранения энергии [6].

Постановка задачи

Рассмотрен процесс трения скольжения твердых тел с плоской контактной поверхностью на основе положений нормативной документации [1, 2] и работ [3—7]. Сила трения T_{1-2}, действующая между телами 1 и 2, является внутренней силой пары трения и ее составляющие $T_{21} = -T_{12}$, действующие в одной и той же точке поверхности трения, но приложенные к различным телам пары трения, на условие равновесия внешних сил, приложенных к паре трения, не влияют [2]. Для каждого из тел пары трения составляющие T_{21} и T_{12} являются внешними силами, которые обеспечивают условие равновесия тел при их равномерном движении. Это условие соблюдается в паре трения как при действии сил трения скольжения, так и сил трения покоя.

В общем случае (рис. 1) сила P_1, приложенная к телу 1 пары трения, передается этому телу со стороны тела (условно не показано на рис. 1), в виде распределенной нагрузки $q_1(S)$ на поверхности (S_{P_1})

$$P_1 = \int_{S_{P_1}} q_1(S)dS.$$

Для пары трения единичной ширины ($b = 1$) длиной l_1 и высотой h_1 сила P_1 является результатом действия распределенной нагрузки $q_1(x) = q_1(S) = q_1$ на участке длиной $l_{P_1} = x_{A_1} - x_{B_1}$ и определяется уравнением

$$P_1 = \int_{l_{P_1}} q_1(x)bdx = q_1 bl_{P_1} = q_1 l_{P_1}, \tag{4}$$

при этом точка K приложения силы P_1 определяется выражением

$$x_K = \frac{\int_{x_{A_1}}^{x_{B_1}} q_1(x)xdx}{\int_{x_{A_1}}^{x_{B_1}} q_1(x)dx}. \tag{5}$$

Под термином "точка приложения силы" будем понимать геометрическую точку на поверхности тела или внутри тела, к которой приводится сила, действующая на тело как равнодействующая удельных сил, распределенных по поверхности или внутри объема этого тела. Размеры точки приложения силы к какому-либо телу (элементу тела) всегда меньше размеров тела (элемента тела), на которое действует сила, каким бы малым не было это тело (элемент тела) [6].

Согласно третьему закону Ньютона, действие силы P_1 на тело 1 уравновешивается действием на это тело силы

$$P_{12} = \int_{P_{12}} q_{12}(x)bdx = q_{12}bl_{P_{12}} = q_{12}l_{P_{12}},$$

приложенной к телу 1 в точке K_1 на контактной поверхности ($q_{12}(x) = -q_{21}(x)$, на рис. 1, *а* условно не показано)

$$\overline{P}_{12} = -\overline{P}_1. \tag{6}$$

Это условие соблюдается как при статическом равновесии тела 1, когда на контактной поверхности пары трения при $\alpha \leqslant \theta$ ($\theta = \text{arctg}(f)$ — угол трения) действует сила трения покоя, так и при равномерном скольжении тела 1, когда на контактной поверхности пары трения действует сила трения скольжения и $\alpha = \theta$ [7]. Принимаем, что положение тела 1 относительно опоры 2 определяется координатой x' в системе непод-

* Идея этого закона принадлежит Леонардо да Винчи [О себе и о своей науке. Т. 1. Academia, 1932]. В ее разработку и формулировку значительный вклад внес Леонард Эйлер [Euler L. Sur la diminution de la resistence du frottemeent. Histoire de L'Academie Royale des Sciences et Belles Lettres a Berlin. 1748. P. 133—148].

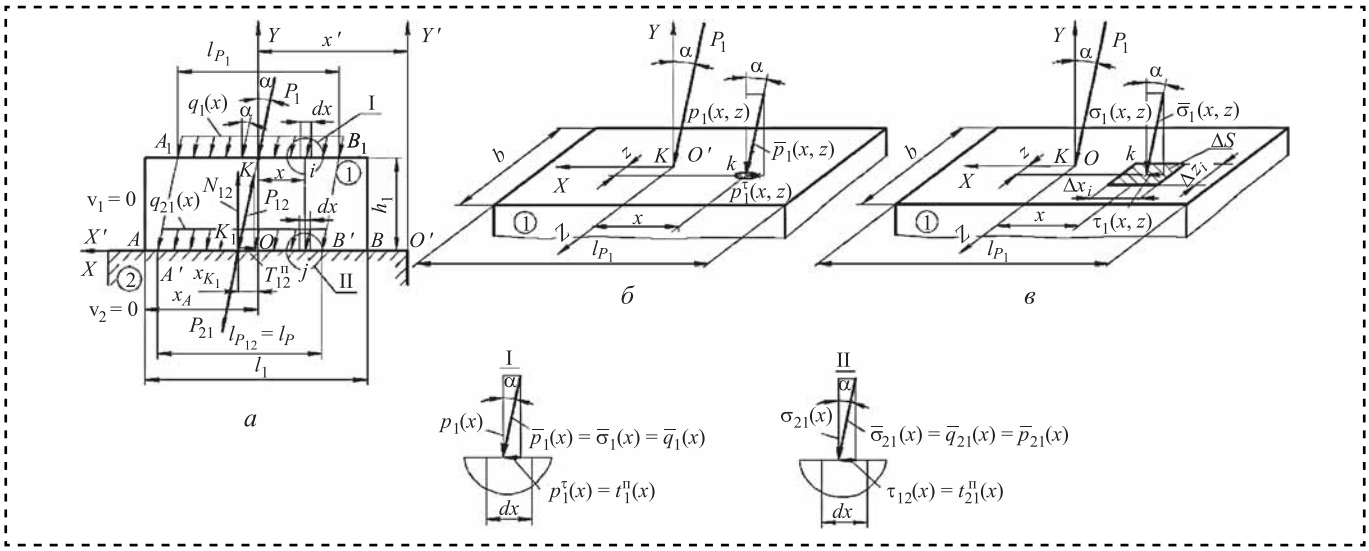


Рис. 1. Характер распределения нагрузки на поверхностях тел пары трения в условиях действия сил трения покоя:
а — расчетная схема при симметричном нагружении контактной поверхности; *б* и *в* — распределение давления и напряжений на свободной поверхности тела 1 пары трения

вижных координат $X'O'Y'$, а силовые параметры взаимодействия тел пары трения определяются в системе подвижных координат XOY, связанных с центром массы тела 1.

Выделим на поверхности $S = bl_{P_1}$ (см. рис. 1, *б*) в окрестностях i-й точки, положение которой определяется координатами (x, $y = h$, z), участок площадью $\Delta S \to 0$ [7].

Значение

$$\overline{p}_1(x, y = h_1, z) = \lim_{\Delta s \to 0} \frac{\Delta \overline{P}_1(x, y = h_1, z)}{\Delta S}, \qquad (7)$$

определяет давление внешней силы $\overline{P}_1$ в каждой точке наружной поверхности тела как векторную величину, так как нормаль к точке поверхности твердого тела представляет нормаль к поверхности тела в данной точке (волнистость и шероховатость наружной поверхности не учитываем). Соответственно, при $y = h_1$ можно записать

$$p_1(x, z) = \overline{p}_1(x, z)\cos\alpha;$$

$$\overline{p}_1^{(\tau)}(x, z) = \overline{p}_1(x, z)\sin\alpha = f_1^{(\text{п})} p_1(x, z) = t_1^{(\text{п})}(x, z),$$

где $p_1(x, z)$ и $p_1^{(\tau)}(x, z)$ — нормальная и тангенциальная составляющие внешнего давления $\overline{p}_1(x, z)$, действующего на тело под определенным углом $\alpha < \theta$ к поверхности этого тела;

$t_1^{(\text{п})}(x, z)$ — удельная сила трения покоя.

Если принять $\Delta S \to \eta$ (рис. 1, *в*), где η — дискретная величина, которая меньше любого заданного малого значения ζ ($0 < \eta < \zeta$), то

$$\lim_{\Delta S \to \eta} \frac{\Delta \overline{P}_1(x, y = h_1, z)}{\Delta S} = \overline{\sigma}_1(x, y = h_1, z) \qquad (8)$$

соответствует векторной величине — напряжению на поверхности тела, которое создает сила P_1 на элементарной площадке ΔS, принадлежащей наружной поверхности тела 1 в окрестностях i-й точки поверхности. При этом положение ΔS на поверхности тела однозначно определяет нормаль к ΔS, восстановленная из i-й точки поверхности тела 1.

Так как ΔS — малая величина, то при $b = 1$ принимаем, что

$$\overline{\sigma}_1(x, y = h_1) = \overline{p}_1(x, y = h_1) = \overline{q}_1(x, y = h_1). \qquad (9)$$

Из выражений (4), (6—9) следует

$$\begin{cases} \overline{P}_1 = \int\limits_S \overline{\sigma}_1(S)dS = \int\limits_0^{l_{P_1}} \overline{p}_1(x)dx = \int\limits_0^{l_{P_1}} \overline{q}_1(x)dx; \\ \overline{P}_{12} = \int\limits_S \overline{\sigma}_{12}(S)dS = \int\limits_0^{l_{P_2}} \overline{p}_{12}(x)dx = \int\limits_0^{l_{P_2}} \overline{q}_{12}(x)dx. \end{cases} \qquad (10)$$

Напряжение на поверхности тела 1 единичной ширины $\overline{\sigma}_1(x) = \overline{q}_1(x)$ можно разложить на составляющие (I на рис. 1), действующие по нормали к поверхности $\overline{\sigma}_1(x) = \overline{\sigma}_1(x)\cos\alpha = \sigma_1(x)$ и параллельно поверхности $\overline{\sigma}_1^{(\tau)}(x) = \overline{\sigma}_1(x)\sin\alpha = \tau_1(x)$.

Решение задачи

Для анализа условий трения на контактной поверхности тел 1 и 2 (см. рис. 1), ограниченной точками поверхности A и B (длиной $l_1 > l_{P_1}$ при $b = 1$), перенесем распределенную нагрузку $q_1(x)$ на контактную поверхность пары трения и получим расчетную нагрузку $q_{21}(x)$ (рис. 1, *а*), дей-

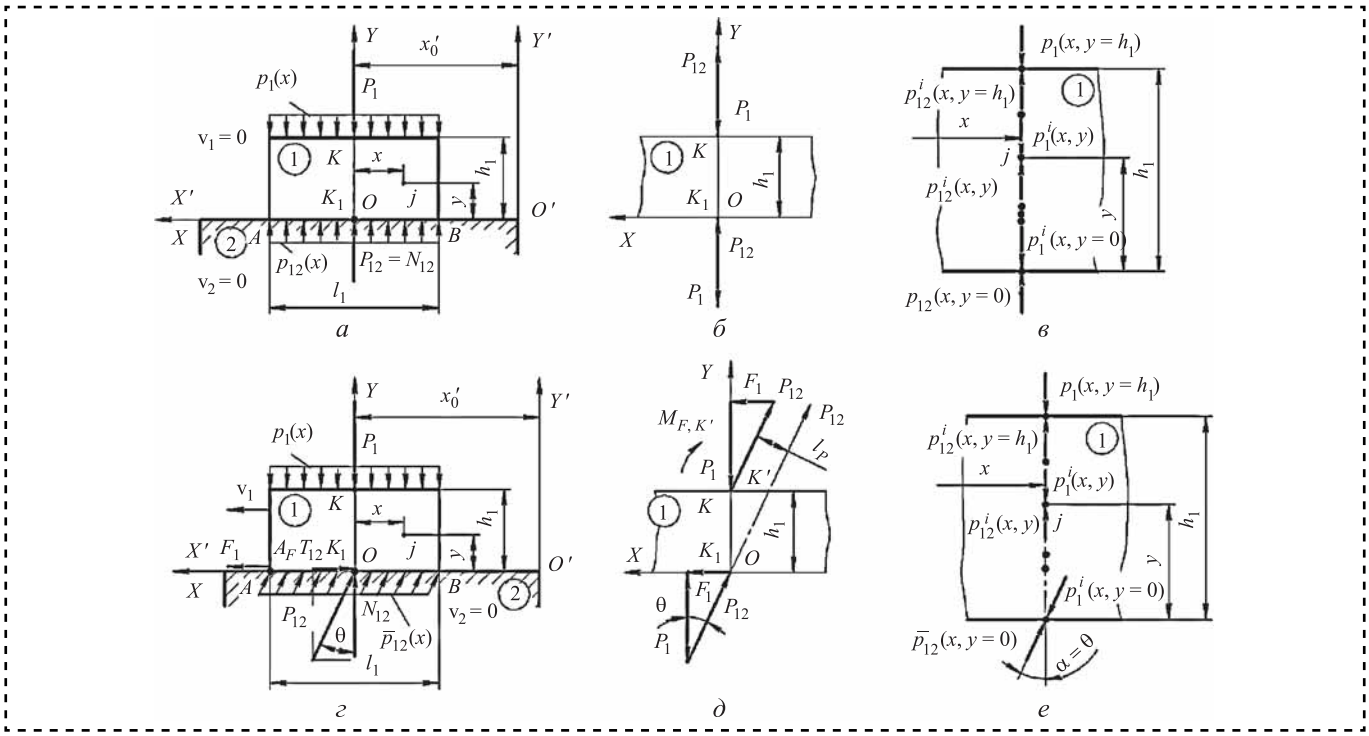


Рис. 2. Характер распределения нагрузки на тело 1 пары трения 1—2:
а, *б*, *в* — при статическом нагружении тела 1 внешней нормальной силой P_1; *г*, *д*, *е* — при равномерном скольжении тела 1 под действием внешней силы движения F_1 и нормальной силы P_1; *б* и *д* — многоугольники сил; *в* и *е* — взаимосвязь внешнего и внутреннего давления тела 1

ствующую на тело 2 со стороны тела 1 на участке контактной поверхности длиной $l_{P_{12}} = l_{P_1} < l_1$, $\left(x_{A_1} - x_{B_1}\right)$ [7]. При этом (II на рис. 1), получим $q_{21}(x) = t_{12}^{(\text{п})}(x) = q_1(x)$. При $x_{A_1} \neq x_A$ и $x_{B_1} \neq x_B$ для статического равновесия тела 1 или его равномерного скольжения наряду с условием (6) необходимо обеспечить условие равенства нулю моментов сил $\bar{P}_1\left(M_{P_1}\right)$ и $\bar{P}_{12}\left(M_{P_{12}} = -M_{P_1}\right)$ относительно точек K и K_1 приложения этих сил к телу 1 за счет перераспределения $q_{21}(x) \neq \text{const}$ при $q_1(x) = \text{const}$ [7].

Условие $q_{21}(x) = p_{21}(x) = p_1(x) = q_1(x)$ обеспечивается только при $\text{v}_1 = \text{v}_2 = 0$ и $\alpha = 0$ (рис. 2, *а*). В этом случае уравнение (1), которое на рис. 2, *б* представляет замкнутый многоугольник сил

$$\bar{P}_1 + \bar{P}_{12} = 0 \tag{11}$$

в точках K и K_1, определяет необходимое и достаточное условие статического равновесия тела 1 $\left(x_0' = \text{const}\right)$, при котором (рис. 2, *в*) распределение давления на поверхности и внутри тела 1 под действием внешних сил определяет уравнение [7]

$$\begin{aligned} p_1\left(x,\ y = h_1\right) &= p_{12}^{(i)}\left(x,\ y = h_1\right) = \ldots = p_1^{(i)}\left(x,\ y\right) = \\ &= p_{12}^{(i)}\left(x,\ y\right) = \ldots = p_1^{(i)}\left(x,\ y = 0\right) = p_{12}\left(x,\ y = 0\right). \end{aligned} \tag{12}$$

При равномерном скольжении тела 1 $(x_0' \neq \text{const}$ и $\text{v}_{12} = \text{v}_1 = \text{const})$ под действием внешней силы движения F_1, приложенной к телу 1 в плоскости (поверхности) трения и уравновешивающей силу трения скольжения, получим

$$F_1 = fN_{12} = fP_1 = P_{12}\sin\alpha, \tag{13}$$

и многоугольники сил в точках K и K_1 будут идентичны

$$\bar{P}_1 + \bar{P}_{12} + \bar{F}_1 = 0. \tag{14}$$

При этом в любой j-й точке тела 1 с координатами $x_j = x = x_{K_1} = x_K$, $0 < y_j = y \leqslant h_1$ силы $\bar{F}_1$ и $\bar{P}_{12}$ создают относительно этой точки уравновешивающие друг друга моменты сил

$$F_1 y_j = P_{12} y_j \sin\alpha. \tag{15}$$

Уравнение (15) соблюдается как при $y_j = 0$, так и при $y_j = h_1$ (см. рис. 2, *б*), когда

$$M_{F_1K} - P_{12} l_P = 0, \tag{16}$$

где $M_{F_1K} = F_1 h_1 = fP_1 h_1$;

$P_{12} l_P = \dfrac{P_1}{\cos\alpha} h_1 \sin\alpha = fP_1 h_1$ — момент сил $\bar{F}_1$ и $\bar{P}_{12}$ относительно точки K.

Из уравнений (10)—(16) получим закон распределения давления на поверхности и внутри скользящего тела, когда сила движения действует в плоскости трения (рис. 2, *е*)

$$\begin{gathered} p_1(x,\ y=h_1)=p_{12}^i(x,\ y=h_1)=\ldots \\ \ldots=p_1^i(x,\ y)=p_{12}^i(x,\ y)=\ldots \\ \ldots=p_1^i(x,\ y=0)=p_{12}(x,\ y=0)= \\ =\bar{p}_{12}(x,y)\cos\alpha=T_{12}\operatorname{ctg}\alpha. \end{gathered} \tag{17}$$

Рассмотрим процесс равномерного скольжения тел пары трения (рис. 3, *а*), когда сила $F_1 = fP_1$ действует параллельно плоскости контакта, как на расстоянии h_F от плоскости трения, так и $h'_F > h_F$. Пунктиром на рис. 3, *а—д* обозначены величины, когда плечо силы F_1 составляет h'_F.

При построении силового многоугольника в точке K_1 приложения силы P_{12} (рис. 3, *д*) необходимо учитывать момент $M_{F_1K_1} = F_1h_1 = fP_1h_F$ силы F_1, который уравновешивается моментом $M_{P_1} = P_1l_N$ силы P_1, плечо которой относительно точки K_1 составляет l_N:

$$l_N = h_F f. \tag{18}$$

Распределение нормального давления $p_{12}(x)$ на поверхности *AB* (рис. 3, *а*) будет определять сумма двух составляющих: давления $p_{12,F}(x)$ (рис. 3, *б*), обусловленного моментом $M_{F_1K_1}$,

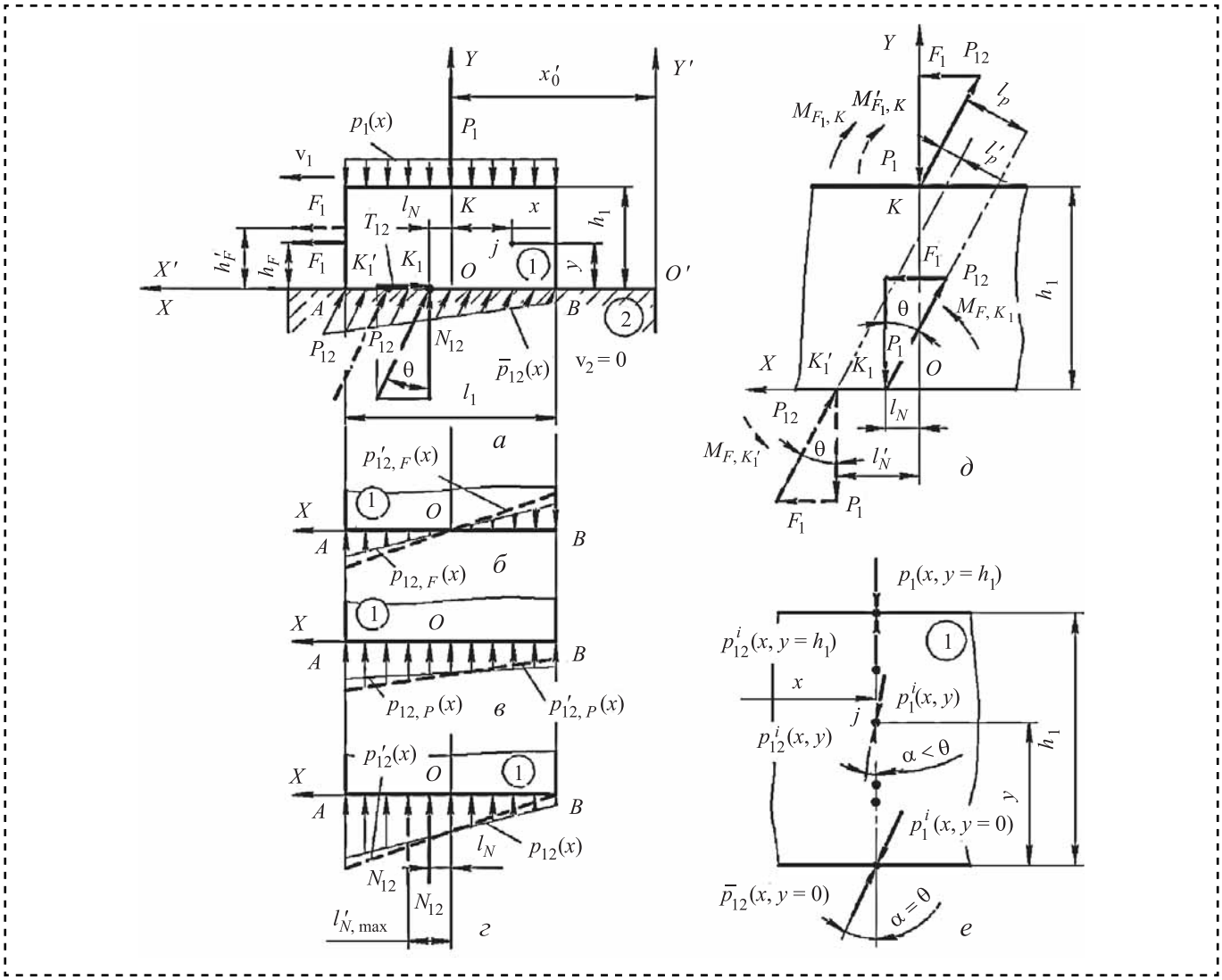


Рис. 3. Характер распределения нагрузки на тело 1 пары трения 1—2 в зависимости от точки приложения силы движения F_1:

а — расчетная схема процесса равномерного скольжения; *б*, *в*, *г* — фрагменты процесса формирования контактных напряжений в зависимости от плеча силы F_1; *д* — силовые многоугольники в точках приложения внешних сил, прижимающих тела пары трения друг к другу; *е* — взаимосвязь внешнего и внутреннего давления тела 1

$$p_{12,F}(x) = \frac{6M_{F_1K_1}}{l_1^2}x = \frac{6fP_1}{l_1^2}x \qquad (19)$$

и давления $p_{12,N}(x)$ (рис. 3, *в*), обусловленного действием силы N_{12} в точке K_1,

$$p_{12,N}(x) = \frac{P_1}{l_1}\left(1 + \frac{6fh_F}{l_1^2}x\right). \qquad (20)$$

Соответственно, получим (рис. 3, *г*)

$$p_{12}(x) = p_{12,F}(x) + p_{12,N}(x) = \frac{P_1}{l_1}\left(1 + \frac{12fh_F}{l_1^2}x\right). \qquad (21)$$

Формула (18) соответствует выражению (5), откуда следует

$$x_{K_1} = l_N = \frac{\int\limits_{-0,5l_1}^{0,5l_1} p_{12}(x)xdx}{N_{12}} = h_F f \qquad (22)$$

при любом $0 \leqslant h_F \leqslant h'_F \leqslant h_1$, когда соблюдается условие

$$p_{12}\left(x = -0,5l_1\right) = p_{12,B} = \frac{P_1}{l_1}\left(1 - \frac{6}{l_1}fh_F\right) > 0$$

и не нарушается условие контакта поверхности тела 1 с опорой 2 в точке B ($x_B = 0,5l$, $y_B = 0$).

Плечо $h'_F > h_F$ силы $F_1 = fP_1$ обеспечивает $M'_{F_1K_1} > M_{F_1K_1}$ и перераспределение $p'_{12}(x_1) \neq p_{12}(x)$, которое приводит к смещению точки K'_1 приложения силы P_{12} (N_{12}) на величину l'_N (рис. 3, *б—г*), не изменяя угол наклона θ силы P_{12} в силовом многоугольнике в точке K (рис. 3, *д*)

$$\begin{cases} M_{F_1K} = F_1\left(h_1 - h_F\right) = P_{12}l_P = P_{12}\left(h_1\sin\alpha - l_N\right); \\ M'_{F_1K_1} = F_1\left(h_1 - h'_F\right) = P_{12}l'_P = P_{12}\left(h_1\sin\alpha - l'_N\right). \end{cases} \qquad (23)$$

Такой характер распределения внешнего давления $\overline{p}_1\left(x,\ y = h_1\right)$ и $\overline{p}_{12}\left(x,\ y = 0\right)$ определяет характер изменения давления $\overline{p}_1^i\left(x,\ y\right)$ внутри тела 1 (рис. 3, *е*)

$$\begin{gathered} p_1\left(x,\ y = h_1\right) = p_{12}^i\left(x,\ y = h_1\right) = \ldots \\ \ldots = \overline{p}_1^i\left(x,\ y\right)\cos\alpha_i = \overline{p}_{12}^i\left(x,\ y\right)\cos\alpha_i = \ldots \\ \ldots = \overline{p}_1^i\left(x,\ y = 0\right)\cos\theta = p'_{12}\left(x,\ y = 0\right)\cos\theta = \\ = \overline{p}_{12}\left(x,\ y\right)\cos\theta = T_{12}\operatorname{ctg}\theta, \end{gathered} \qquad (24)$$

где $0 \leqslant \alpha \leqslant \theta$.

Из уравнения (22) следует

$$l'_N = h'_F f \qquad (25)$$

и распределение $p'_{12}\left(x\right)$ при $p'_{12,B}(x = -0,5l) = 0$ (рис. 3, *г*) определяет

$$l'_{N,\max} = \frac{\int\limits_{-0,5l_1}^{0,5l_1} p'_{12}(x)xdx}{N_{12}} = \frac{l}{6} = h'_{F,\max} \geqslant h'_F f \qquad (26)$$

при $F_1 = fP_1$.

Условие действия силы $F'_1 > fP_1 = T_{12}$ при $v_1 = \text{const}$ и $h''_F > h'_{F,\max}$ (рис. 4, *а*) до момента начала поворота тела 1 относительно точки A контактной поверхности возможно только в том случае, когда наряду с действием силы трения $T_{12} = fN_{12}$ в точке K_1 на расстоянии $l'_{N,\max}$ на границе контактной поверхности в точке A, будет действовать сосредоточенная сила сопротивления движению скользящему телу 1 — сила трения $T_{12}^{\text{в}}$ внешней зоны пары трения. В этом случае результирующая сила сопротивления скольжению тела 1 представляет приведенную силу трения (рис. 4, *б*)

$$T_{12,\text{пр}} = T_{12} + T_{12}^{\text{в}}, \qquad (27)$$

которая действует в точке K''_1 поверхности трения (рис. 4, *б*, *в*).

При этом угол наклона силы

$$\overline{P}_{12,\text{пр}} = \int\limits_{-0,5l}^{0,5l} \overline{p}''_{12}(x)xdx = \overline{T}_{12,\text{пр}} + \overline{N}_{12} \qquad (28)$$

представляет приведенный угол трения

$$\theta_{\text{пр}} = \operatorname{arctg}\left(f_{\text{пр}}\right), \qquad (29)$$

где $f_{\text{пр}} = \dfrac{T_{12,\text{пр}}}{N_{12}} = \varphi\left(f,\ h''_F,\ l\right)$ — приведенный коэффициент трения, учитывающий влияние габаритов скользящего тела и способ приложения внешних сил, обеспечивающих равномерное скольжение тела.

Условие равномерного скольжения тела 1 (рис. 4, *в*) определяют многоугольники сил

$$\overline{F}'_1 + \overline{P}_{12,\text{пр}} + \overline{P}_1 = 0 \qquad (30)$$

в точках K''_1, K приложения сил $P_{12,\text{пр}}$, P_1 и равенство моментов внешних сил F_1, P_{12} и P_1 относительно точек K''_1 и K:

$$\begin{cases} M_{F'_1K} = F_1\left(h_1 - h''_F\right) = P_{12,\text{пр}}l''_P = \\ = P_{12,\text{пр}}\left(h_1\sin\alpha - l''_N\right); \\ M_{F'_1K''_1} = F_1h''_F = P_1l''_N. \end{cases} \qquad (31)$$

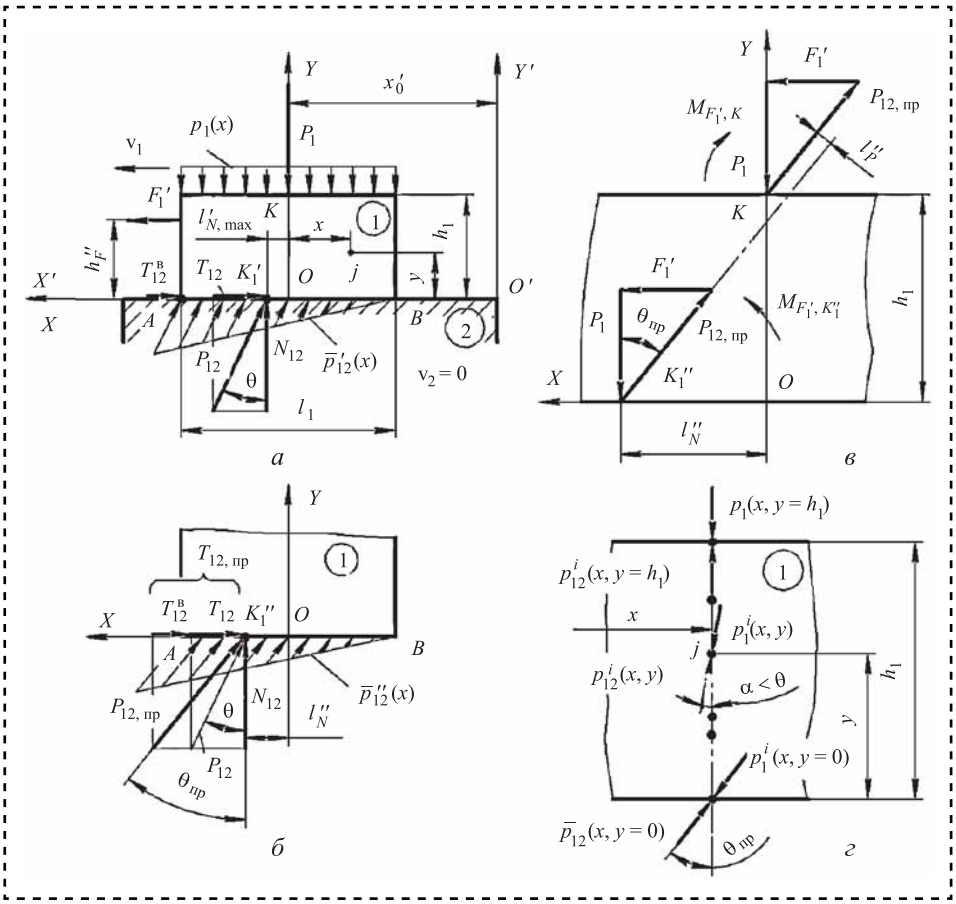


Рис. 4. Характер распределения нагрузки на тело 1 пары трения 1—2 при равномерном скольжении тела 1 под действием силы $F_1' > T_{12}$:
а — расчетная схема процесса равномерного скольжения; *б* — фрагмент процесса формирования контактных напряжений под действием силы F_1'; *в* — силовые многоугольники в точках приложения внешних сил, прижимающих тела пары трения друг к другу; *г* — взаимосвязь внешнего и внутреннего давления тела 1

Такой характер действия внешних сил обусловлен перераспределением давления $\overline{p}_{12}''(x,\ y=0)$ при неизменном давлении $p_1(x,\ y=h_1)$ и определяет изменение внутреннего давления в теле 1:

$$\begin{gathered} p_1(x,\ y=h_1) = p_{12}^i(x,\ y=h_1) = \ldots \\ \ldots = \overline{p}_1^i(x,\ y)\cos\alpha_i = \overline{p}_{12}^i(x,\ y)\cos\alpha_i = \ldots \\ \ldots = \overline{p}_1^i(x,\ y=0)\cos\theta_{\text{пр}} = p_{12}'(x,\ y=0)\cos\theta_{\text{пр}} = \\ = \overline{p}_{12}(x,\ y)\cos\theta_{\text{пр}} = T_{12}\operatorname{ctg}\theta_{\text{пр}}, \end{gathered} \tag{32}$$

где $0 \leqslant \alpha \leqslant \theta_{\text{пр}}$.

Анализ приведенных теоретических решений и их сравнение с результатами работ [3—7] показывают следующее.

1. Уравнение (28) по структуре соответствует уравнению (3) и определяет приведенную силу трения скольжения как результирующую силу двух сил сопротивления относительному скольжению тел пары трения. Силы трения скольжения прямо пропоциональны внешней нормальной силе, прижимающей тела пары трения друг к другу, и сосредоточенной силе сопротивления внешней зоны пары трения, которая зависит от соотношения геометрических размеров скользящего тела и положения точки приложения силы движения к этому телу, смещенной относительно поверхности трения. При этом, если внешняя сила движения действует в плоскости трения и уравновешивает силу трения скольжения, сосредоточенная сила сопротивления внешней зоны трения равна нулю и уравнение (28) преобразуется в уравнение (13). Соответственно, уравнение (3) преобразуется в уравнение (2).

2. Сила трения не имеет источника энергии, который может накапливать механическую энергию внешних сил, действующих на тела пары трения, чтобы вернуть эту энергию (или ее часть) механической системе после прекращения действия внешних сил пары трения. Сила трения может только передать (сила трения покоя) силу от одного тела пары трения другому либо преобразовать (сила трения движения) механическую энергию внешней силы движения ведущего тела пары трения в другой вид энергии в процессе взаимодействия внешних сил пары трения.

3. Равномерная внешняя удельная нагрузка на свободной поверхности скользящего тела пары трения в процессе трения может преобразовываться в неравномерную удельную нагрузку на контактной поверхности пары трения. Соответственно, удельная сила трения как составляющая часть удельной нагрузки контактной поверхности в общем случае не является величиной, равномерно распределенной по контактной поверхности, и зависит от приведенного коэффициента трения скольжения, подставляющего отношение приведенной силы трения к нормальной силе, прижимающей тела пары трения друг к другу.

В частном случае, когда внешняя сила движения действует на равномерно скользящее тело в плоскости трения, приведенный коэффициент трения представляет коэффициент трения скольжения прямо попорциональный нормальной силе, прижимающей тела трения друг к другу.

4. Сила давления внутри твердого скользящего тела по отношению к направлению линии действия внешней нормальной силы изменяется по высоте этого тела от угла наклона, равного приведенному углу трения на плоской контактной поверхности, до нуля на "свободной" поверхности скользящего тела и отражает изменение градиента сдвигового сопротивления внутри тела. При условии, когда приведенный угол трения на контактной поверхности равен углу трения (сила движения скользящего тела действует в плоскости трения), изменение угла наклона внутреннего давления происходит только вблизи контактной поверхности и тем самым отражает изменение градиента сдвигового сопротивления в поверхностном контактном слое скользящего тела.

5. Закон распределения удельной нагрузки на поверхности контакта тел пары трения однозначно определяет величину, направление и точку приложения силы давления на скользящее тело со стороны опоры. Если известна сила, действующая на поверхности контакта пары трения, то для определения закона распределения удельной контактной нагрузки необходимо решать систему уравнений, каждое из которых отражает специфические особенности действия сил трения на контактной поверхности.

6. Механика процесса внешнего трения определяется энергосиловыми параметрами контактного взаимодействия тел пары трения, а явление внешнего трения обусловливает физико-химическую природу контактных сил, которые проявляют себя в процессе трения с учетом характеристики поверхности трения и условий смазки. Эти два неразрывно связанных между собой понятия отражают причинно-следственные связи внешнего трения, и их математическое описание должно учитывать особенности как механики процесса внешнего трения, так и природу явления внешнего трения, не подменяя эти понятия, а дополняя одно другим.

Выводы

Характер распределения контактных напряжений при определенных условиях взаимодействия внешних сил пары трения оказывает влияние на результирующую силу сопротивления скольжению тел пары трения за счет появления на поверхности трения сосредоточенной силы, действующей в плоскости трения и оказывающей дополнительное сопротивление относительному смещению тел пары трения. В этих условиях закон сухого трения содержит две составляющие силы трения скольжения, взаимосвязанные между собой нормальной силой, прижимающей тела пары трения друг к другу.

Представление материального тела с плоской поверхностью контакта в виде материальной точки исключает из анализа контактного взаимодействия тел пары трения влияние моментов внешних сил относительно точки приложения результирующей силы трения, обусловленных габаритами скользящего тела и способом приложения внешних сил, на закон распределения контактных напряжений. Без этого учета расчетная и реальная схемы силового взаимодействия тел пары трения в процессе внешнего трения не соответствуют друг другу. В результате этого создаются предпосылки для формулирования задач парадоксов процессов сухого трения.

Библиографический список

1. **Теоретическая** механика. Терминология. Буквенные обозначения величин: сборник рекомендуемых терминов. М.: Наука, 1984. Вып. 102.

2. **ГОСТ 27674—88.** Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1988. 20 с.

3. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Основы расчета на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

4. **Основы** трибологии (трение, износ, смазка): учебник для вузов / А.В. Чичинадзе и др.; под общ. Ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

5. **Журавлев В.И.** 500 лет истории сухого трения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Естественные науки". 2014. № 2. С. 21—31.

6. **Добров И.В.** Физические основы процессов внешнего трения при решении задач прикладной механики // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. № 7. С. 3—10.

7. **Добров И.В.** Анализ процессов трения твердых и пластически деформируемых тел в механике машин на примере осадки симметричной заготовки плоскими бойками // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2009. № 2. С. 3—8.

УДК 620.172.178.2

С.В. Болдырев, **А.М. Белоусов, О.П. Бударова**, *канд. техн. наук*
(Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета)
E-mail: underminder@mail.ru

Экспериментальные исследования влияния механических примесей, содержащихся в масле, на износ качающего узла аксиально-поршневого насоса

Приведены результаты стендовых испытаний аксиально-поршневых насосов с рабочей жидкостью, загрязненной механическими примесями. Получены графические зависимости интенсивности изнашивания и шероховатости поверхности поршней насоса PVB-10 от содержания механических примесей. Оптимальный уровень загрязнения масла — 0,02...0,03 %. Увеличение загрязненности механическими частицами от 0,03 до 0,06 % приводит к росту интенсивности изнашивания в 4 раза.

The article presents the results of bench tests of axial-piston pumps with fluid contaminated with mechanical impurities. Summary graphs show wear rate and surface roughness of pump pistons PVB-10 in relation to presence of mechanical impurities with sufficient agreement accuracy. The desirable level of oil contamination corresponds to the content of mechanical particles in range of 0,02...0,03 %. Increasing of contamination from 0,03 to 0,06 % leads to 4 times higher wear rate.

Ключевые слова: стендовые испытания, аксиально-поршневые насосы, загрязнения, рабочие жидкости, изнашивание, пары трения.

Keywords: bench tests, axial-piston pumps, impurities, fluids, wear, friction couples.

При абразивном изнашивании пар трения гидромашин [1, 2], например, в процессе стендовых испытаний насосов, в качестве загрязнителя используется кварцевый порошок с постоянным заданным диаметром частиц [3]. Однако в рабочих жидкостях гидросистем механические загрязнения имеют весьма разнообразный состав и далеко не все частицы являются абразивными по отношению, например, к стали. Помимо механических частиц в рабочих жидкостях неизменно присутствуют растворенная и нерастворенная воздушные фазы с определенной влажностью, а иногда и вода в виде капель. Если допустить адиабатическое сжатие пузырьков воздуха в момент повышения давления в рабочей камере насоса, то возникающие при этом температуры могут принимать довольно высокие значения. При изменении давления от 0,1 до 5 МПа, показателе политропы $n' = 1{,}7$ и начальной температуре 323 К конечная температура внутри воздушного пузырька составит 1606 К [4]. В таких условиях пары трения объемных гидромашин испытывают ударную нагрузку от паровых пузырей, образующихся вследствие мгновенного замыкания воздушных пузырьков. Присутствие нагретых твердых частиц усиливает ударную нагрузку и приводит к опасным пластическим деформациям рабочих органов гидромашин [5].

При испытании пар трения "диск—колодка", аналогичных по составу парам трения аксиально-поршневых насосов "Vickers", на машине трения СМТ-1 со смазкой, содержащей твердые загрязнения, интенсивность изнашивания стального образца оказалась выше, чем бронзового более чем в 200 раз. Таким образом, в паре трения "поршень—втулка" следует ожидать в первую очередь износа поршня. При наличии в масле 0,04 %, мас. неорганических примесей в три раза увеличился коэффициент трения, вдвое возрасла температура в зоне контакта. Массовая доля загрязнений в испытаниях достигла 0,39 %. В гидросистемах станочного оборудования она гораздо ниже и находится в пределах от 0,005 до 0,06 %. Графическая зависимость интенсивности изнашивания от концентрации механических примесей носила логарифмический ха-

рактер, а зависимость коэффициента трения и температуры в зоне контакта пары трения от того же фактора подчинялась гиперболическому закону. Поскольку насыщение гиперболической функции происходит раньше, чем логарифмической (углы наклона гиперболических кривых меньше), коэффициенты трения и температуры в зоне контакта пары трения стабилизировались уже при массовой доле механических примесей 0,08 %. Фактором, влияющим на износ, но не связанным с абразивным трением, может являться влажный нерастворенный воздух, попадающий в смазку из атмосферы.

Методика проведения стендовых испытаний

Провели стендовые испытания аксиально-поршневого насоса PVB-10 с механическими загрязнениями в количествах, характерных для промышленного гидропривода. В гидробак стенда КИ4815-М через фильтр залили свежее масло ИГП-18. Температуру масла по ходу испытаний насоса с помощью теплообменника поддерживали постоянной, 30...32 °С. Нагрузка на насос составляла 4 МПа, что соответствует оптимальному режиму работы испытуемого насоса. Подача насоса — $0{,}417 \cdot 10^{-3}$ м^3/с. Загрязнение масла механическими примесями осуществляли введением их в гидробак стенда. После проведения очередного испытания насос вскрывали. С двух контрольных поршней снимали профилограммы шероховатости и профиля линейной части поршней с помощью профилографа-профилометра "Talisurf-4". Окончательно содержание механических примесей определяли на основе анализа масла, взятого непосредственно из корпуса насоса после разборки. Химический анализ показал меньшее содержание механических примесей по сравнению с введенным в масло, что связано с выпадением на дно гидробака наиболее крупных частиц размером 250 × 875 (металл) и 175 × 350, 250 × 625 мкм (кварц), а также составляющих максимальную долю частиц металла и кварца размером более 40 мкм.

Результаты спектрального анализа введенных абразивных частиц и осадка на дне гидробака после проведения испытаний приведены в табл. 1.

Различие в спектральных анализах механических примесей объясняется тем, что определенная доля частиц находилась во взвешенном состоянии и участвовала в изнашивании исследуемых пар трения, а остальные, более тяжелые частицы, вместе с продуктами изнашивания оседали на дно гидробака.

Таблица 1

Результаты спектрального анализа, %

Ba	Fe	Pb	Si	Ca	Cu	Al	Cr
Введенные абразивные частицы							
0,0072	>6	0,084	1,5	0,18	1,5	2,7	0,33
Осадок на дне гидробака							
0,035	0,1550	0,0060	0,0400	0,7	0,007	0,018	Ост.

Так как при испытаниях на машине трения было установлено, что интенсивность изнашивания диска (аналог поршня) на 1—2 порядка выше, чем интенсивность изнашивания колодки (аналог втулки), то можно считать, что износ пары трения "поршень—втулка" будет определяться в первую очередь износом поршня. Профилограммы втулок показали очень низкие значения параметра шероховатости поверхности (сотые доли микрометра), поэтому дальнейшее профилографирование втулок не выполняли. Уменьшение интенсивности абразивного изнашивания деталей из более мягкого материала связано с тем, что абразивные частицы внедряются в поверхностный слой мягкого материала и, таким образом, могут быть приведены в пассивное состояние. На этот факт указывал в своих работах И.В. Крагельский.

Высоту изношенного слоя металла определяли наложением профилограмм цилиндрической поверхности девяти поршней по шести контрольным сечениям.

Скорость изнашивания по слою:

$$\gamma_h = \Delta h / \Delta T,$$

где Δh — средняя высота изношенного слоя;

ΔT — продолжительность испытаний.

Интегральная интенсивность изнашивания по слою:

$$I_h = \Delta h / L = \gamma_h \Delta T / L,$$

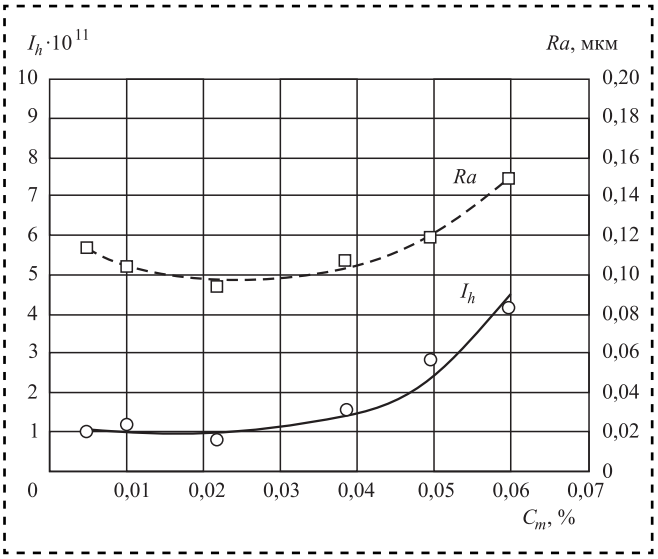
где L — путь трения, $L = 2ln\Delta T$;

l — длина рабочей поверхности поршня;

n — частота вращения вала насоса.

Результаты стендовых испытаний

На основании экспериментальных и расчетных данных построены графики зависимости интенсивности изнашивания поршней по слою



Зависимость интегральной интенсивности изнашивания I_h поршней насоса и параметра шероховатости *Ra* их рабочей поверхности от массовой доли механических примесей C_m

I_h и параметра шероховатости их поверхности *Ra* от массовой доли механических примесей C_m (рисунок).

Параметр шероховатости *Ra* усредняли по двум контрольным поршням. Характер изменения параметра шероховатости при увеличении содержания загрязнений почти синхронно повторяет характер изменения интенсивности изнашивания, что говорит о хорошем качестве эксперимента. Согласно экспериментальным данным существенное увеличение изнашивания поршней начинается при массовой доле механических примесей, большей чем 0,04 %. При изменении C_m от 0,04 до 0,05 % интегральная интенсивность изнашивания возрастает почти в два раза. Минимальное значение интенсивности изнашивания поршней наблюдали при массовой доле загрязнений 0,02 %, т.е. произошло некоторое снижение интенсивности изнашивания относительно ее значения при меньших C_m. Это позволяет предположить, что наличие механических примесей до известного предела может сказываться на работе насоса положительно и связано с тем, что механические частицы, попадающие в зазор в небольших количествах, ведут себя подобно подшипникам и таким образом улучшают условия работы пар трения.

Для расчета технического ресурса гидромашины необходимо задать вероятность $P(T)$, с которой объект безотказно проработает T часов и решить относительно T уравнение:

$$P(T) = 0,5 + \Phi\left(\frac{X_{\max} - \overline{\gamma}T}{T\sigma_\gamma}\right), \qquad (1)$$

где $\Phi(\bullet)$ — нормированная функция Лапласа;

$X_{\max}$ — предельно допустимое значение параметра объекта, например зазора в поршневой паре;

$\overline{\gamma}$ — среднее значение скорости процесса повреждения или изменения выходного параметра, например, скорости изнашивания блока поршней;

σ_γ — среднее квадратичное отклонение скорости процесса (скорости изнашивания).

Если расчет вести по скорости изнашивания (по слою) блока поршней объемного насоса, то за $X_{\max}$ можно принять значение зазора, вызывающего снижение подачи насоса на 20...25 %. Надежность привода в целом в большой степени определяется работоспособностью насоса и гидродвигателя или гидромотора. Поэтому расчетное значение технического ресурса гидромашины приблизительно соответствует техническому ресурсу гидропривода.

Результаты расчета срока службы насоса в часах непрерывной работы по формуле (1) по средней скорости изнашивания, т.е. с учетом уменьшения скорости изнашивания после приработки приведены в табл. 2. Расчетные вероятности безотказной работы приняты равными 0,9 и 0,95. Максимальный ресурс насоса соответствует не минимальному содержанию механических примесей, как следовало бы ожидать, а значению 0,022 %. При увеличении массовой доли загрязнений до 0,06 % ресурс снижается приблизительно в 3 раза.

Таблица 2

Расчетный срок службы насоса PVB-10

Массовая доля примесей C_m, %	Срок службы насоса T, ч	
	$P(T) = 0,9$	$P(T) = 0,95$
0,005	22 900	19 600
0,010	21 500	18 700
0,022	26 300	22 200
0,039	18 400	16 300
0,050	10 000	8790
0,060	8190	7340

Заключение

Стендовые испытания насоса PVB-10 показали, что его наилучшие ресурсные характеристики могут быть получены, если содержание загрязнений в масле не превышает 0,02...0,03 %. Аналогичный результат был получен при испытании образцов на машине трения. С дальнейшим увеличением концентрации загрязнений от 0,03 до 0,06 % интенсивность изнашивания поршней увеличивается приблизительно в 4 раза с тенденцией к дальнейшему росту при больших значениях C_m.

Библиографический список

1. **Шейнман Е.Л.** Абразивный износ. Обзор американской печати. Абразивная стойкость материалов // Трение и износ. 2006. № 1. С. 110—122.
2. **Брыков М.Н.** Абразивное изнашивание железоуглеродистых сплавов // Трение и износ. 2006. № 1. С. 105—109.
3. **Барышев В.И.** Классификация, контроль и нормирование промышленной чистоты рабочих жидкостей и масел // Вестник ЮУрГУ. 2005. № 1. С. 149—161.
4. **Бударова О.П., Болдырев С.В.** Методика расчета гидроэрозионного изнашивания пар трения аксиально-поршневых насосов при наличии воды и воздуха в рабочей среде // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 9. С. 10—14.
5. **Budarova O.P., Boldyrev S.V.** Development of a mathematical model of the hydroerosive wear of the piston couple in hydraulic machines: Part 1 // Journal of Friction and Wear. Allerton Press, Inc. USA. 2014. Vol. 35. No. 5. P. 434—438.

УДК 621.778

Г.Н. Гурьянов, *канд. техн. наук*
(ООО "ФЕНИКС + ", г. Белорецк, Республика Башкортостан)
E-mail: ggnbelorhome@rambler.ru

Влияние коэффициентов контактного трения и вытяжки проволоки на радиальную силу в рабочем конусе волоки

Приведены результаты расчета радиальной силы, действующей на волоку, запаса прочности и единичной предельной вытяжки при волочении стальной проволоки в зависимости от параметров деформации. Радиальная сила уменьшается с повышением угла волочения, напряжения противонатяжения, коэффициента контактного трения, со снижением интенсивности деформационного упрочнения материала проволоки и увеличивается с повышением исходного напряжения текучести материала проволоки и степени деформации в проходе волочения.

Results of calculation of radial force are given on I drag, margin of safety and the size of a single limit extract when drawing a steel wire depending on deformation parameters. Radial force on I drag decreases with increase of an angle of drawing, tension of an antitension, coefficient of contact friction, with decrease in intensity of deformation hardening of material of a wire and increases with increase of an initial limit of fluidity of material of a wire and extent of deformation in drawing pass.

Ключевые слова: волочение, проволока, методика расчета, радиальная сила, коэффициенты трения и упрочнения, угол волочения, предельная вытяжка в проходе волочения.

Keywords: drawing, wire, calculation procedure, radial force, coefficients of friction and hardening, the angle of drawing, size of a limit extract in drawing pass.

Радиальная сила, действующая на поверхность рабочего вкладыша волоки, вызванная деформацией обрабатываемой заготовки, может привести к его расколу. Качественная запрессовка вкладыша в стальную обойму снижает вероятность раскола. Кроме того, запрессовкой можно создать окружные (тангенциальные) напряжения сжатия в деформирующей поверхности вкладыша, что повышает ее стойкость к абразивному и усталостному износу. Для обеспечения требуемого уровня сжимающих напряжений в материале вкладыша необходимо знать радиальную силу на

поверхности заготовки в зависимости от основных параметров деформации [1, 2].

Радиальную нагрузку на контактную поверхность конуса определим из уравнения:

$$P_к = \int_S (\sigma_{Si} - \sigma_{Zi})\, dS, \qquad (1)$$

где σ_{Si}, σ_{Zi} — текущие напряжения текучести и осевое напряжение в конусе;

S — площадь контакта, зависящая от сечения заготовки и величины деформации.

Примем зависимость напряжения текучести обрабатываемого металла от величины вытяжки μ в виде степенной функции [3]:

$$\sigma_{Si} = \sigma_{S0}\mu^k, \qquad (2)$$

где σ_{S0} — напряжение текучести металла на входе рабочего конуса волоки;

k — коэффициент упрочнения;

$\mu = (r_0/r_k)^2$ — коэффициент вытяжки;

r_0, r_k — радиус заготовки до и после деформации соответственно.

В уравнении (1) разность в скобках выражает абсолютный запас прочности металла в рабочем канале:

$$\Delta\sigma_i = \sigma_{Si} - \sigma_{Zi}. \qquad (3)$$

Абсолютный запас прочности — положительная величина, и при его равенстве нулю имеем предельный случай волочения, когда наступает обрыв тянущего конца заготовки или наступает внеконтактная деформация за волокой. Равенство $\Delta\sigma_i = 0$ определяет коэффициент предельной вытяжки $\mu_п$ в проходе волочения.

Вдоль длины очага деформации увеличиваются значения σ_{Si}, σ_{Zi} [4—6]:

$$\sigma_{Z1} = \sigma_{S0}\left(\mu^k - 1\right)\left(1 + f\,\mathrm{ctg}\,\alpha\right)/k, \qquad (4)$$

где f — коэффициент трения;

α — угол наклона образующей рабочего конуса к оси волочения.

Прирост напряжения от действия напряжения противонатяжения σ_{q0} рассчитывали по формуле [1, 5]:

$$\sigma_{Z2} = \sigma_{q0}/\mu^{f\,\mathrm{ctg}\,\alpha}. \qquad (5)$$

Текущее осевое напряжение на выходе рабочего конуса волоки σ_{Zi}, входящее в формулу (3), равно сумме его составляющих σ_{Z1} и σ_{Z2}.

Радиальную нагрузку на рабочий конус волоки $P_к$ и абсолютный запас прочности $\Delta\sigma$ определяли в зависимости от коэффициента вытяжки при α = 6 и 9° и следующих значениях коэффициента контактного трения: 0; 0,01; 0,025; 0,05; 0,075 (рис. 1). Исходное напряжение текучести σ_{S0} обрабатываемого металла 1000 МПа, коэффициент k деформационного упрочнения 0,25, диаметр на выходе заготовки 2 мм, противонатяжение отсутствует (рис. 1, *а*, *в*, *г*, *е*) и равно 200 МПа (рис. 1, *б*, *д*).

На рис. 1, *а—в* проведены линии I через вершины кривых для зависимостей радиальной силы от коэффициента вытяжки, абсциссы которых определяют предельную вытяжку $\mu_п$ при разных значениях коэффициента трения. Точки пересечения линий абсолютного запаса прочности с осью абсцисс также указывают на предельную вытяжку при заданных коэффициентах трения (рис. 1, *г—е*).

Абсцисса вершины кривой для радиальной силы равна коэффициенту предельной вытяжки $\mu_п$. В общем случае одной величине радиальной силы соответствуют два значения коэффициента вытяжки, одно из которых больше коэффициента предельной вытяжки. Поэтому перед расчетом силы $P_к$ по формуле (1) необходимо убедиться, что задаваемое значение коэффициента вытяжки меньше $\mu_п$. Построение кривых для за-

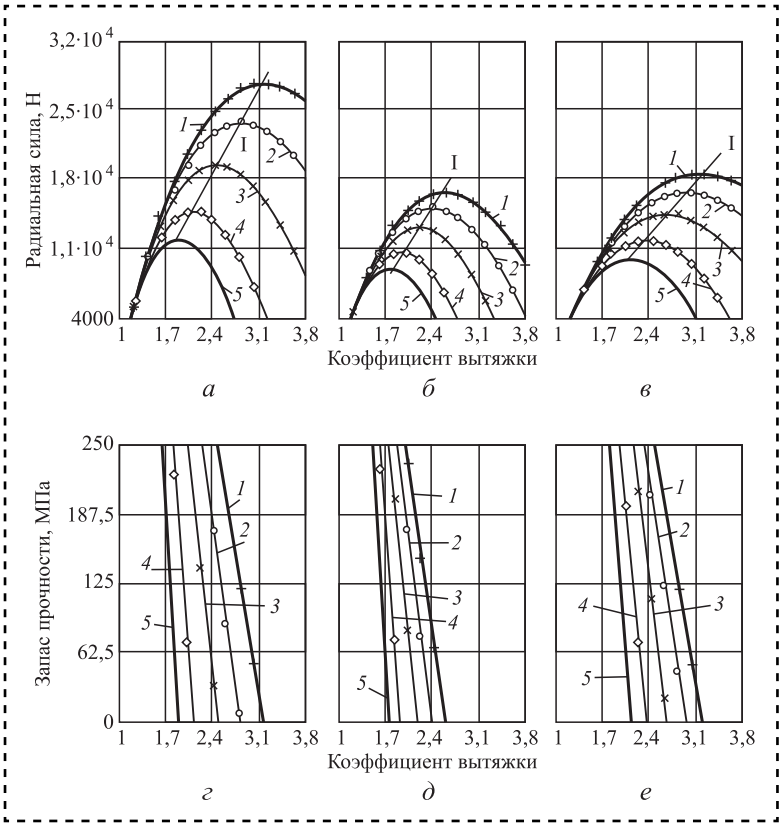


Рис. 1. Влияние коэффициентов вытяжки и трения на радиальную силу и абсолютный запас прочности:

а, *б*, *г*, *д* — α = 6°; *в*, *е* — α = 9°; *а*, *в*, *г*, *е* — σ_q = 0; *б*, *д* — σ_q = 200 МПа; *1* — f = 0; *2* — f = 0,01; *3* — f = 0,025; *4* — f = 0,05; *5* — f = 0,075; I — линия для коэффициента предельной вытяжки в зависимости от коэффициента трения

висимостей радиальной силы позволяет оценить не только радиальную силу, но и коэффициент предельной вытяжки, возможность деформации без разрушения металла при заданном обжатии. Графики для абсолютного запаса прочности или решение уравнения (3) относительно коэффициента вытяжки дают возможность более точно определить предельное значение $\mu_п$, по которому уточняют значение радиальной силы из уравнения (1). При отсутствии противонатяжения величина коэффициента предельной вытяжки больше при $\alpha = 9°$ (рис. 1, *в*, *е*), чем при 6° (рис. 1, *а*, *г*).

Расстояние между линиями на рис. 1, *а*, *г* больше, чем на рис. 1, *в*, *е*. С увеличением угла α уменьшается влияние значения коэффициента трения на радиальную нагрузку и предельную вытяжку. Приложение противонатяжения (рис. 1, *б*, *д*) в зависимостях $P_к$ и $\Delta\sigma$ от коэффициента *f* вызвало смещение линии I предельной вытяжки в сторону уменьшения коэффициента μ.

При малых значениях коэффициента трения и угла α действует значительная радиальная сила на рабочий конус, что может вызвать разрушение твердосплавного вкладыша при некачественной его запрессовке. Это необходимо учитывать особенно при волочении в режиме гидродинамического трения, когда малы напряжения контактного трения и создается дополнительное давление технологической смазки перед входом в очаг пластической деформации проволоки [7, 8].

На рис. 2 приведены зависимости $P_к$ и $\Delta\sigma$ при коэффициенте трения 0,025; 0,05 и 0,075 и различных значениях угла α. Расчет выполнен при коэффициенте упрочнения 0,25 и отсутствии противонатяжения. На основе кривых для радиальной силы проведены линии I предельной вытяжки в зависимости от угла α. С ростом угла α и коэффициента *f* уменьшается радиальная сила (рис. 2, *а*—*в*). Расстояние между кривыми для радиальной силы уменьшилось с ростом коэффициента *f*, что указывает на снижение степени влияния угла α на силу $P_к$.

Влияние коэффициентов вытяжки и упрочнения, а также напряжения противонатяжения на значения $P_к$ и $\Delta\sigma$ показано на рис. 3. С увеличением коэффициента упрочнения возрастают значения радиальной силы и предельной вытяжки; повышается влияние напряжения противонатяжения на радиальную нагрузку. При этом с ростом коэффициента упрочнения расстояние между линиями запаса прочности увеличилось незначительно, т.е. влияние противонатяжения на запас прочности почти не изменилась (рис. 3, *г*—*е*).

Напряжение противонатяжения в большей степени влияет на форму кривых для радиальной силы, чем на форму линий для запаса прочности. Чем больше напряжение противонатяжения, тем меньше радиальная сила, запас прочности и коэффициент предельной вытяжки. С ростом коэффициента вытяжки кривые для запаса прочности $\Delta\sigma$ при разных значениях напряжения противонатяжения остаются почти параллельными. Таким образом, характер и степень влияния на запас прочности напряжения противонатяжения не изменяются с увеличением степени деформации заготовки.

В настоящее время недостаточно данных о величине радиальной силы на рабочую поверхность волочильного инструмента по причине сложности расчета [1, 9]. Аналитические зависимости для расчета напряжения волочения в большинстве случаев получены при допущении, что материл проволоки или прутка имеет реологию идеального жесткопластического тела Мизеса с усредненным величиной напряжением текучести в очаге деформации. Принятие такой реологии не обеспечивает строгого подхода к расчету радиальной силы на твердосплавный вкладыш волоки инженерным методом или методами линий скольжения, верхней оценки и баланса работ.

На основе формулы (4) выполнен аналитический расчет радиальной нагрузки на рабочий ко-

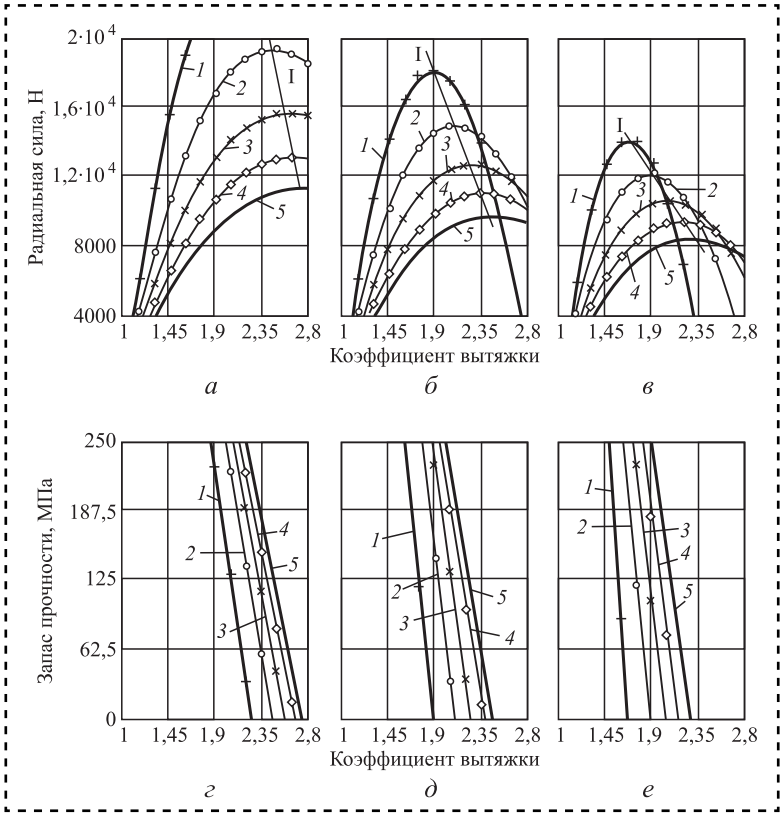


Рис. 2. Влияние коэффициента вытяжки и угла α на радиальную силу и абсолютный запас прочности при коэффициенте упрочнения 0,25:
а, *г* — $f = 0{,}025$; *б*, *д* — $f = 0{,}05$; *в*, *е* — $f = 0{,}075$; *1* — $\alpha = 4°$; *2* — $\alpha = 6°$; *3* — $\alpha = 8°$; *4* — $\alpha = 10°$; *5* — $\alpha = 12°$; I — линия для коэффициента предельной вытяжки в зависимости от угла α

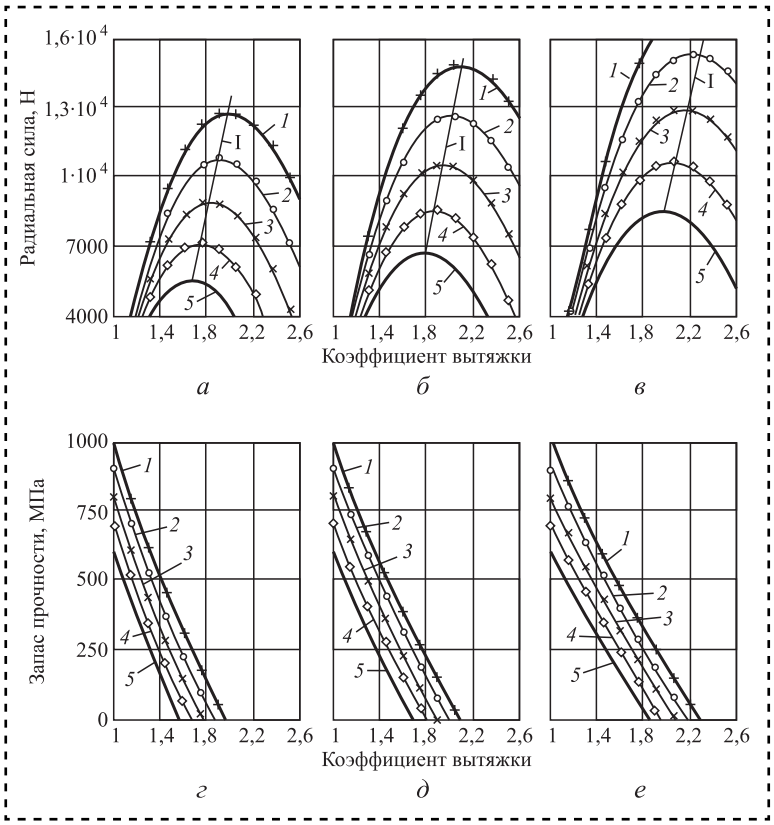


Рис. 3. Влияние коэффициента вытяжки и напряжения противонатяжения на радиальную силу и абсолютный запас прочности при $f = 0{,}05$ и $\alpha = 6°$:

а, *г* — $k = 0$; *б*, *д* — $k = 0{,}25$; *в*, *е* — $k = 0{,}50$; *1* — $\sigma_q = 0$; *2* — $\sigma_q = 100$ МПа; *3* — $\sigma_q = 200$ МПа; *4* — $\sigma_q = 300$ МПа; *5* — $\sigma_q = 400$ МПа; I — линия для коэффициента предельной вытяжки в зависимости от напряжения противонатяжения

нус волоки с учетом формы кривой упрочнения (2) и изменения вдоль рабочего канала радиального напряжения при разных значениях основных параметров деформации [5, 6], определена радиальная сила на рабочий конус волоки по формуле (1).

Если принять во внимание только зависимости радиального напряжения от коэффициента вытяжки (см. рис. 1 — рис. 3, *а—в*), то из графиков следует снижение радиальной силы с некоторой критической величины коэффициента вытяжки при росте степени деформации. Отсюда возможен неверный вывод, что коэффициент вытяжки целесообразно задавать выше этой критической величины для разгрузки волоки от радиальной силы. Результаты расчета абсолютного запаса прочности показали (см. рис. 1 — рис. 3, *г—е*), что в момент достижения максимальной радиальной силы абсолютный запас прочности равен нулю. Поэтому снижение радиальной силы на волоку при росте степени деформации не может реализоваться из-за разрушения заготовки. Таким образом, прочностной расчет с использованием силового критерия разрушения — абсолютного запаса прочности — исключает возможность заметного снижения радиальной силы с некоторой критической величины коэффициента вытяжки. Но этот критерий разрушения в других задачах исследования не всегда обеспечивает достоверный прогноз момента обрыва тянущего конца заготовки [5]. Требуется применение других критериев разрушения, например, деформационных. При расчете радиальной нагрузки на волоку необходима проверка отсутствия разрушения материала проволоки в очаге пластической деформации и на выходе волоки при заданных параметрах деформации.

Выводы

Уравнение (4) учитывает изменение деформации вдоль длины очага напряжения текучести. Поэтому его применение позволило установить характер влияния коэффициента деформационного упрочнения на радиальную силу и запас прочности. Абсцисса точки максимума на кривой зависимости радиальной силы от коэффициента вытяжки дает оценку коэффициента предельной вытяжки в проходе волочения. Радиальная сила, запас прочности и предельная степень деформации за проход волочения существенно зависят от коэффициентов вытяжки, трения и упрочнения, напряжения противонатяжения и угла наклона образующей рабочего конуса волоки. Результаты расчета показали положительное влияние контактного трения и противонатяжения на разгрузку волоки от радиальной силы, а также необходимость проверки отсутствия разрушения деформируемого материала при заданных параметрах деформации.

Библиографический список

1. **Перлин И.Л., Ерманок М.З.** Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 447 с.
2. **Когос А.М.** Механическое оборудование волочильных и лентопрокатных цехов. М.: Металлургия, 1980. 312 с.
3. **Изготовление** высококачественных метизов (научный и практический опыт Белорецкого металлургического комбината) / В.А. Кулеша и др. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати. 1999. 328 с.
4. **Гурьянов Г.Н.** Расчет осевых напряжений при степенной зависимости предела текучести от вытяжки // Процессы и оборудование металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. О.С. Железкова. Магнитогорск: МГТУ, 2006. Вып. 7. С. 216—218.
5. **Гурьянов Г.Н.** Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. Магнитогорск: МГТУ, 2008. 358 с.
6. **Гурьянов Г.Н.** Радиальная сила на волоку и запас прочности при волочении проволоки // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 2. С. 19—22.
7. **Колмогоров В.Л., Орлов С.И., Колмогоров Г.Л.** Гидродинамическая подача смазки. М.: Металлургия, 1975. 256 с.
8. **Колмогоров Г.Л.** Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
9. **Тарнавский А.Л.** Эффективность волочения с противонатяжением. М.: Металлургиздат, 1959. 152 с.

УДК 539.3

Н.С. Рапилбекова, *канд. физ.-мат. наук*
(Таразский государственный педагогический институт, Республика Казахстан)
E-mail: seisennag@list.ru

Теплопроводность в многослойных конструкциях с изменяющейся границей

Исследования температурного поля в многослойных конструкциях с изменяющейся границей проведены на основе разработанного численного метода решения, основанного на обобщении метода прогонки в одномерной нестационарной теплопроводности. Оценка изменяющейся границы проведена на основе анализа результатов численного решения уравнений теплопроводности в зависимости от теплофизических характеристик материала отдельных слоев при идеальном условии теплообмена на контактной поверхности слоев.

The researches of temperature distribution in many layer constructions with changing boundary are carried out on the basis of developed and described technique of solution based on generalization of method of pro race on one-dimensional non-stationary heat conductivity. The estimation of changing boundary is spent on the basis of result analysis of conductivity equation solution in dependence at thermo-physical properties of separate layer material at ideal condition of head exchange on interfacial surface.

Ключевые слова: температура, теплопроводность, источники тепла, идеальный теплообмен, слоистые среды, нестационарная теплопроводность.

Keywords: temperature, heat conductivity, heat sources, ideal heat exchange, layered environments, non-stationary heat conductivity.

Введение

Практика эксплуатации изделий космической, авиационной, ракетной техники с теплозащитными элементами, выполненных из углерод-углеродных (УУКМ) или керамических композиционных материалов (ККМ), показала, что в условиях обтекания высокоскоростными потоками газа возможен унос части теплозащитных элементов [1, 2]. Границы самого изделия изменяются при выгорании тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) в ядерных реакторах [3]. Яркими примерами изменения границ при температурных воздействиях являются технологии получения тугоплавких материалов и изделий из них методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-метод) [4], методами прототипирования [5] и состояние поверхности льда при изменении температуры окружающей среды [6]. Методы математического моделирования тепловых процессов в таких явлениях разработаны недостаточно.

Изменения границы могут быть учтены:

— вариант 1: выбором коэффициента теплообмена α в граничных условиях без изменения реальных границ исследуемого тела;

— вариант 2: введением в граничные условия слагаемого, зависящего от скорости уноса массы и теплового эффекта физико-химических превращений на поверхности без изменения реальных границ исследуемого тела;

— вариант 3: путем изменения реальной границы исследуемого тела при выполнении определенных условий (критериев выгорания границы) и зависимостью коэффициента теплообмена α на границе от этих условий.

Конечно-разностная модель решения нестационарной теплопроводности в слоистых средах непосредственно может быть использована для решения задач с изменяющейся границей в рамках

первого варианта. Так как при формулировке граничных условий предполагается, что коэффициенты теплообмена α_0^1 и α_L^M есть функции температуры

$$\alpha_0^1 = \alpha_0^1(T);\ \alpha_L^M = \alpha_L^M(T), \qquad (1)$$

то для того, чтобы использовать разработанный алгоритм решения нестационарных задач теплопроводности достаточно определить зависимость α_0^1 и α_L^M от температуры из опытов с изделиями с изменяющимися границами.

Обобщенные в случае нестационарных задач теплопроводности с изменяющейся границей условия конвективного теплообмена на границе принимаются в виде [1]:

$$\lambda^1 T_{,r}^1 = \alpha_0^1\left(T^1 - T^{1oc}\right) + (\partial m/\partial t)Q^* \ \text{ при } \ r = L_0^1, \qquad (2)$$

где T^1 и T^{1oc} — температуры тела и окружающей среды;

λ^1, α_0^1 — коэффициенты теплопроводности и теплообмена;

m — масса унесенного с поверхности $r = L_0^1$ материала;

Q^* — тепловой эффект физико-химических превращений на наружной поверхности;

r — производная по соответствующей переменной.

Алгоритм решения нестационарных задач теплопроводности можно использовать для случая обобщенных граничных условий (2), если заданы функции ($\partial m/\partial t$) и параметр Q^* [7].

При решении широкого класса задач методом конечных элементов используется алгоритм, в котором жесткость конечного элемента приравнивается нулю, при выполнении в этом элементе дополнительных условий, например критерия разрушения. Аналогичный подход применительно к третьей краевой задаче нестационарной теплопроводности реализован ниже. Критерием является критическая температура $T_{крит}$, при достижении которой ячейка перестает участвовать в теплообмене с внешней средой. Закон изменения границы регулируется характером изменения коэффициента теплообмена от температуры — заданием функции (1). При этом унос массы прямо пропорционален превышению температуры над критической, т.е. граница x^{s+1} (1) внутренней поверхности цилиндра перемещается по закону

$$x^{s+1}(1) = x^s(1) + u_{cr}\left(T - T_{крит}\right) / \left(T_{max} - T_{крит}\right)$$
$$\text{при } T > T_{крит}; \qquad (3)$$
$$x^{s+1}(1) = x^s(1) \quad \text{при } T \leqslant T_{крит},$$

где u_{cr} — коэффициент пропорциональности.

Постановка задачи теплопроводности в конструкции с изменяющейся границей

Для учета изменения границы при достижении критической температуры исследовали пятислойный цилиндр с внутренним радиусом r_0 и наружным R. Одномерная задача нестационарной теплопроводности описывается уравнениями теплопроводности для каждого слоя [7], число слоев 5 (k = 1, ..., 5):

$$\rho^k c_\varepsilon^k T_{,t}^k = \left(\lambda^k T_{,r}^k\right)_{,r} + Q^k(r;\ t), \qquad (4)$$

где λ^k, c_ε^k, ρ^k — коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала k-го слоя;

$Q^k(r;\ t)$ — внутренние источники тепла в слое.

Уравнения (4) решены при начальных условиях

$$T^k = T^k(r;\ 0) = T_0^k(r). \qquad (5)$$

Тепловое состояние цилиндрического корпуса над рабочим колесом высокотемпературной турбины определяется следующими условиями конвективного теплообмена на внутреннем радиусе цилиндра $\xi_0 = r_0/R = 409/413{,}64 \approx 0{,}99$:

$$\varphi_0^1(\tau) = \begin{cases} A\tau & \text{при } 0 \leqslant \tau \leqslant \tau_1; \\ A\tau_1 & \text{при } \tau_1 \leqslant \tau \leqslant \tau_2; \\ A(\tau_2 - \tau) & \text{при } \tau_2 \leqslant \tau \leqslant \tau_3; \\ 0 & \text{при } \tau_3 \leqslant \tau, \end{cases} \qquad (6)$$

где $\tau = t/t^*$ — безразмерное время;

t^* — характерное время;

A — параметр, характеризующий максимальный уровень температуры газа в турбине (в расчетах принят равным 1693 K).

Безразмерное значение параметра A равно 1. Параметр τ_1 характеризует скорость повышения температуры. Наиёболее длительный крейсерский режим работы изделия ($\tau_1 \leqslant \tau \leqslant \tau_2$) проходит при постоянной и максимальной температуре $A\tau_1$. На этапе выключения двигателя ($\tau_2 \leqslant \tau \leqslant \tau_3$) температура газа снижается. Разность параметров $\tau_3 - \tau_2$ характеризует скорость убывания температуры газа до нуля, которая далее поддерживается неизменной.

При таком воздействии высокотемпературного газа тонкостенный корпус быстро прогревается, и температура несущей металлической обечайки может достигнуть предельных значений. Для того, чтобы это предотвратить температуру наружной поверхности корпуса (ξ_L = 1) поддер-

живают на определенном уровне с применением охлаждающего хладагента. При выборе степени охлаждения по возможности снижают градиент температуры, а следовательно, и температурные напряжения в несущей металлической части конструкции. На наружной поверхности ($\xi_L = 1$) цилиндра организуется температурное поле

$$\varphi_K^k(\tau) = \begin{cases} A_L\tau & \text{при } 0 \leqslant \tau \leqslant \tau_{1L}; \\ A_L\tau_1 & \text{при } \tau_{1L} \leqslant \tau \leqslant \tau_{2L}; \\ A_L(\tau_2 - \tau) & \text{при } \tau_{2L} \leqslant \tau \leqslant \tau_{3L}; \\ 0 & \text{при } \tau_{3L} \leqslant \tau. \end{cases} \quad (7)$$

Представленное выражениями (7) температурное воздействие считается достаточно консервативным. В реальности оно более гибкое и управляется специальной системой. Решение нестационарной задачи теплопроводности ограничено условиями (6) и (7) и проведено с целью демонстрации возможности разработанного алгоритма расчета.

При переходе от k-го слоя к (k + 1)-му слою приняты условия идеального теплообмена, в соответствии с которыми тепловые потоки и температуры на поверхности контакта одинаковы:

$$\lambda^k T_{,r}^k = \lambda^{k+1} T_{,r}^{k+1} \text{ и } T^k = T^{k+1} \quad \text{при } r = L^k = L^{k+1}. \quad (8)$$

Решение задачи теплопроводности конструкции с изменяющейся границей

Уравнения (4) при начальных (5) и граничных условиях (6), (7), а также идеальном (8) теплообмене между слоями решены конечно-разностным методом с применением процедуры прямой и обратной прогонки [8]. В табл. 1 приведены принятые в расчетах уровни критических температур, при достижении которых узел в соответствии с выражением (3) исключается из рассмотрения. В расчетах использованы приведенные в табл. 1 и 2 рас-

Таблица 1

Характеристики материалов в зависимости от уровня критической температуры

Номер слоя	Материал	Плотность, кг/м^3	Температура, К		Начальный радиус r_0, мм
			Предельная	Критическая	
1	ZrO_2+Y_2O_3	5580	2300	1660	409,0
2	85 % ZrO_2+Y_2O_3 и 15 % CoCrAlY	5823	2000	1620	409,32
3	70 % ZrO_2+Y_2O_3 и 30 % CoCrAlY	6066	1700	1580	409,64
4	40 % ZrO_2+Y_2O_3 и 60 % CoCrAlY	6552	1550	1550	409,96
5	Жаропрочный сплав ЖС6У	8200	1300	1300	410,28
Примечание: толщина ЖС6У — 3,3 мм, остальных слоев — 0,32 мм.					

Таблица 2

Теплофизические характеристики материалов при различных температурах

Материал	Температура, °С				
	20	400	800	1200	1300
Теплопроводность, Вт/(см·°С)					
Сплав ЖС6У	0,084	0,126	0,210	0,273*	0,325*
Y_2O_3 с ZrO_2	0,503	0,514	0,608	0,840	1,091
85 % Y_2O_3 с ZrO_2 и 15 % CoCrAlY	0,503	0,724	1,112	1,301	2,192
70 %Y_2O_3 с ZrO_2 и 30 % CoCrAlY	0,503	0,797	1,353	2,213	2,874
40 %Y_2O_3 с ZrO_2 и 60 % CoCrAlY	0,503	0,860	1,584	2,671	3,503
Теплоёмкость, Дж/(г·°С)					
Сплав ЖС6У	0,45	1,60	3,25	4,925*	6,15*
Y_2O_3 с ZrO_2	1,4	1,975	2,675	3,4	3,85
85 %Y_2O_3 с ZrO_2 и 15 % CoCrAlY	2,1	2,475	2,95	3,41	3,75
70 %Y_2O_3 с ZrO_2 и 30 % CoCrAlY	2,175	2,55	3,0	3,5	3,85
40 %Y_2O_3 с ZrO_2 и 60 % CoCrAlY	2,325	2,7	3,1	3,575	3,85
* Характеристики сплава ЖС6У являются условными.					

Таблица 3

Параметры температурного воздействия в размерной форме

Граничные условия	A, К	t_1, с	t_2, с	t_3, с
(6)	$A_0 = 1693$	36	3300	3372
(7)	$A_L = 693$	72	3300	3444
(7)	$A_L = 293$	72	3300	3444

четные значения теплофизических характеристик материалов отдельных слоев.

Общее время температурного воздействия на пятислойный цилиндр составляло 3600 с. В табл. 3 приведены значения параметров температурного воздействия в размерной форме. В расчетах характерное время $t^* = t_1 = 36$ с.

На этапе роста температуры $0 \leqslant \tau \leqslant \tau_1$ наблюдается рост температуры как на границе, так и внутри (рисунок (синие линии) на стр. 4 обложки). Изменения тепловых потоков в пределах первых четырех слоев незначительны из-за малого отличия их коэффициентов теплопроводности (см. табл. 2). При переходе от 4-го слоя к 5-му существенно изменяется наклон кривой распределения температуры. Максимальное значение температуры на внутренней поверхности цилиндра при $r = r_0$ равно 1693 К.

При достижении критической температуры $T_{крит}$ на внутренней поверхности цилиндра r_0 граница смещается. Смещение характеризуется концом линейного участка изменения температуры от координаты в соответствии с равенством (3). При этом на этапе выдержки температуры на внутренней поверхности цилиндра r_0 на максимальном уровне температуры $T_{мах}$ смещение границы продолжается — граница линейного участка постепенно растет и перед началом снижения температуры область смещения границы является наибольшей. При коэффициенте пропорциональности $u_{cr} = 0{,}0011$ мм первый слой полностью, а второй — частично выгорают. Точкой новой границы исследуемой области является точка перелома линейного участка изменения температуры у внутренней поверхности корпуса (см. рисунок, *а* на стр. 4 обложки). Перед сбросом температуры достигается максимальное значение выгоревшего участка.

Для сравнения на рисунке, *б* (см. стр. 4. обложки) приведены результаты таких же вычислений, но выполненных при меньшем значении коэффициента пропорциональности $u_{cr} = 0{,}0004$. При достижении критической температуры $T_{крит}$ на внутренней поверхности цилиндра r_0 граница смещается. При этом степень смещения меньше, чем в случае $u_{cr} = 0{,}0011$, так как угол наклона кривой на этапе выдержки температуры и перед сбросом температуры значительно больше.

Таким образом, разработан численный алгоритм исследования задач нестационарной теплопроводности в слоистых конструкциях с изменяющейся границей. Разработанный алгоритм при соответствующей формулировке критических условий (критической температуре) и физико-химических превращениях можно использовать для решения широкого круга прикладных задач.

Библиографический список

1. **Мурашов М.В.** Математическое моделирование температурных полей: автореф. дис.... канд. техн. наук. М., 2005. 16 с.
2. **Фролов Г.А., Баранов В.Л.** Температурный профиль в стационарном и нестационарном режимах прогрева и уноса массы низкотеплопроводных материалов // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78. № 6. С. 49—55.
3. **Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И.** Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1996. 400 с.
4. **Мержанов А.Г.** Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов // Успехи химии. 72 (4). 2003. С. 323—345.
5. **Холпанов Л.И., Закиев С.Е., Шимковский И.В.** Моделирование тепловых процессов при лазерном спекании реакционно способных порошковых композиций // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78. № 6. С. 42—48.
6. **Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
7. **Каримбаев Т.Д., Рапилбекова Н.С.** Метод прогонки в пространственных задачах нестационарной теплопроводности // Конструкции из композиционных материалов. 2009. Вып. 4. С. 3—17.
8. **Гельфанд И.М., Локуциевский О.В.** Метод прогонки для решения разностных уравнений / С.К. Годунов, В.С. Рябенький. Введение в теорию разностных схем. М.: Физматгиз, 1962. 340 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 08.09.2016. Подписано в печать 25.10.2016. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

К сведению авторов журнала «Сборка в машиностроении, приборостроении»

Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 12 страниц, напечатанных на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через два интервала 12-м кеглем.

Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

В редакцию предоставляется статья в электронном виде – файл (с расширением .doc или .pdf) с набором текста (шрифт Times New Roman) или распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа).

Электронная версия может быть выслана по e-mail: sborka@mashin.ru

Требования к оформлению статьи

1. Обязательно должны быть представлены сведения об авторах:

- Ф.И.О.;
- ученая степень и звание (если есть);
- место работы;
- должность;
- адреса и телефоны (домашний и служебный), факс;
- E-mail.

Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.

2. Обязательно представлять на русском и английском языках:

- фамилии, имена и отчества авторов, название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- название статьи;
- аннотацию к статье;
- ключевые слова.

3. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

- УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации http://teacode.com/online/udc/);
- авторы (с указанием ученой степени);
- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

Ссылку на гранты необходимо обозначать звездочкой (*) на первой странице.

4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского (не готического) и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

5. После текста должен быть приведен список литературы, используемой при написании статьи.

Составляется список по порядку ссылок в тексте и оформляется по ГОСТ 7.0.5–2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать пяти наименований. Допускаются ссылки на литературу не ранее 2000 г. выпуска (при необходимости ссылку на более "старый" источник литературы приводят непосредственно в тексте).

6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf, .jpeg 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисуночную подпись. Подрисуночные подписи следует представлять отдельным списком. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков.

Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст!

Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении ред. совета без предоставления рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются

Плата за публикацию статей не взимается