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

3 2011 (128)

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

Авцинов И.А., Дроботов А.В., Кристаль М.Г. Вибротранспортные устройства для автоматической сборки с переменным характером трения (сухое – жидкостное) на несущей поверхности . . . 3

Лапынин Ю.Г., Макаренко А.Н., Архипов А.А. Универсальное оборудование для присоединения патрубков к аппаратам, находящимся под давлением . . . 7

Современные технологии сборки

Абрамов И.В., Абрамов А.И., Синицын А.Н., Синицына В.В. Теоретическое обоснование новых способов сборки и разборки соединений с натягом . . . 11

Ковалёв В.Г., Ковалёв С.В. Применение расчетных параметров инструмента для совершенствования процесса электромонтажа накруткой . . . 16

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Клычев А.А. Определение погрешностей относительного положения сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей при роботизированной сборке . . . 20

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Плотников А.Л., Сергеев А.С., Крылов Е.Г., Кристаль М.Г., Заярный В.П. Автоматический контроль состояния сборного многолезвийного инструмента . . . 25

Пашеева Т.Ю. Точность и стабильность технологических процессов – путь эффективного воздействия на качество изготовления сборочно-сварочных металлоконструкций . . . 29

Носков В.Н. Развитие функциональных возможностей систем управления моделированием технических объектов . . . 35

Экономика и организация сборочного производства

Коклёнков Д.А. Организация системы сборки изделий на малом предприятии . . . 39

В помощь конструктору, технологу

Арефьев И.В., Лапин И.Е., Стяжин В.Н., Савинов А.В., Лысак В.И., Полесский О.А. Моделирование тепловых процессов локальной электродуговой термообработки сварных соединений неплавящимся электродом . . . 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.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: sborka@mashin.ru; tsmm@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.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА
А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор)
А.А. ГУСЕВ
М.В. ВАРТАНОВ
А.М. ДАЛЬСКИЙ
И.Н. ЗИНИНА
Ю.Л. ИВАНОВ
Ю.Г. КОЗЫРЕВ
А.И. КУМЕНКО
А.В. МЕДАРЬ
Е.А. МИКРИН
Ю.Ф. НАЗАРОВ
В.В. ПОРОШИН
Б.В. ШАНДРОВ
А.А. ШАТИЛОВ
А.Г. ХОЛОДКОВА
Г.А. ЯРКОВ

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО
БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО
ВЛАДИВОСТОК
Ю.Н. КУЛЬЧИН
А.А. СУПОНЯ
В.М. КОРНИЕНКО
ВОЛГОГРАД
В.Г. КАРАБАНЬ
М.Г. КРИСТАЛЬ
В.И. ЛЫСАК
В.М. ТРУХАНОВ
ИЖЕВСК
И.В. АБРАМОВ
Б.А. ЯКИМОВИЧ
В.Г. ОСЕТРОВ
И.К. ПИЧУГИН
КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ
КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ
КОЛОМНА
Ю.Д. АМИРОВ
КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
Б.Н. МАРЬИН
В.И. ШПОРТ
А.М. ШПИЛЕВ
НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ
С.В. ДМИТРИЕВ
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ
НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ
ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ
ОРЕЛ
Ю.С. СТЕПАНОВ
Г.А. ХАРЛАМОВ
ОРЕНБУРГ
А.Н. ПОЛЯКОВ
А.И. СЕРДЮК
А.П. ФОТ
РЫБИНСК
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
В.В. НЕПОМИЛУЕВ
А.Н. СЕМЕНОВ
САМАРА
М.А. ЕВДОКИМОВ
Ю.А. ВАШУКОВ
Г.А. КУЛАКОВ
В.А. НИКОЛАЕВ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.Ф. КУЗЬМИН
Е.В. ШАЛОБАЕВ
ТОЛЬЯТТИ
А.И. РЫЖКОВ
Б.Ф. ХАЗОВ
ТУЛА
В.В. ПРЕЙС
ХАБАРОВСК
В.А. ЛАШКО

Украина
КИЕВ
А.С. ЗЕНКИН
В.А. МАТВИЕНКО
ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ
СЕВАСТОПОЛЬ
Е.Л. ПЕРВУХИНА

Беларусь
МИНСК
В.Л. БАСИНЮК
ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ
ПОЛОЦК
М.Л. ХЕЙФЕЦ

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
Л.Д. ПАРШЕНКОВА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1747 от 25 февраля 2000 г.

© Издательство “Машиностроение”, “Сборка в машиностроении, приборостроении”, 2011

THE MONTHLY NEWSMAGAZINE FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

3 2011 (128)

CONTENTS

Production tools and machinery for assembly

Avtsinov I.A., Drobotov A.V., Kristal M.G. Vibrating conveyors for automatic assembly with a variable friction (powder – liquid) on the bearing surface 3

Lapynin Yu.G., Makarenko A.N., Arhipov A.A. The universal equipment for joining of branch pipes to designs being under pressure 7

Modern technologies in assembly

Abramov I.V., Abramov A.I., Sinitsyn A.N., Sinitsyna V.V. Theoretical justification of interference fit assembling and disassembling now methods 11

Kovalev V.G., Kovales S.V. Application design tool options to improve electrical instalation wire 16

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Klychev A.A. Definition of errors of the relative positions of interfaced surfaces connected details at the robotised assemblage 20

Quality assurance. Testing. Monitoring

Plotnikov A.L., Sergeev A.S., Krylov E.G., Crystal M.G., Zayarny V.P. Automated condition monitoring for assembled cutting tool 25

Pasheeva T.Yu. Murmansk state technical university, seabome-mechanical faculty, department of technology of metals and ship repair 29

Noskov V.N. Development of functionalities of control systems of modelling of technical objects 35

Economy and the organization of assembly

Koklenkov D.A. The organization of system of assemblage products at small enterprise 39

Industrial and design engineer's aid

Arefjev I.V., Lapin I.E., Styazhin V.N., Savinov A.V., Lysak V.I., Polesskiy O.A.

Modelling of thermal processes of local electroarc heat treatment of welded connections nonmelting tlectrode 44

Journal is distributed on subscription, which can be issued 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.: (499) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.
http://www.mashin.ru E-mail: sborka@mashin.ru; tsmm@mashin.ru
Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building"
107076, Moscow, Stromynsky per. 4
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
VASIL'EV A.S. (Chief editor)
VARTANOV M.V.
DALSKY A.M.
GUSEV A.A.
ZININA I.N.
IVANOV YU.L.
KOZYREV YU.G.
KUMENKO A.I.
MEDAR' A.V.
MIKRIN E.A.
NAZAROV Yu.F.
POROSHIN V.V.
SHANDROV B.V.
SHATILOV A.A.
KHOLODKOVA A.G.
YARKOV G.A.

Regional editors

BELGOROD
PELIPENKO N.A.
BRIANSK
GORLENKO O.A.
VLADIVOSTOK
KULSHIN Yu.N.
SUPONIA A.A.
KORNIENKO V.M.
VOLGOGRAD
KRISTAL M.G.
KARABAN' V.G.
LYSAK V.I.
TRUKHANOV V.M.
IZHEVSK
ABRAMOV I.V.
YAKIMOVICH B.A.
OSETROV V.G.
PITCHUGIN I.K.
KAZAN
ADGAMOV R.I.
KOVROV
ZHITNIKOV Yu.Z.
KOLOMNA
AMIROV Yu.D.
KOMSOMOLSK-ON-AMUR
MARJIN B.N.
SCHPORT V.I.
SHPILEV A.M.
NABEREZHNYE CHELNY
DMITRIEV S.V.
KHISAMUTDINOV R.M.
NIZHNY NOVGOROD
GOLUBEV S.V.
OMSK
KOSTIUKOV V.N.
OREL
STEPANOV Yu.S.
KHARLAMOV G.A.
ORENBURG
POLYAKOV A.N.
SERDUK A.I.
FOT A.P.
RYBINSK
BEZIAZYSHNY V.F.
NEPOMILUEV V.V.
SEMENOV A.N.
SAMARA
EVDOKIMOV M.A.
VASHUKOV Yu.A.
KULAKOV G.A.
NIKOLAEV V.A.
ST.-PETERSBURG
KUZMIN V.F.
SHALOBAEV E.V.
TULA
PREYS V.V.
TOLIATI
KHAZOV B.F.
RYZHKOV A.I.
KHABAROVSK
LASHKO V.A.

Ukraine
KIEV
ZENKIN A.S.
MATVIENKO V.A.
DONETSK
MIKHAILOV A.N.
SEVASTOPOL
PERVUKHINA E.L.

Belarus
MINSK
BASINJUK V.L.
GOMEL
STARZHINSKI V.E.
POLOTSK
KHEIFETZ M.L.

Executive editors of current issue:
PARSHENKOVA L.D., GLIKMAN I.M.

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-and Broadcasting and Mass Communications Media.
Registration certificate ПИ № 77-1747, February 25, 2000 Free price

© "Mashinostroenie Publishers", "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2011

УДК 621.5+62-521

И.А. Авцинов, *д-р техн. наук,* ***А.В. Дроботов,*** *аспирант,* ***М.Г. Кристаль,*** *д-р техн. наук*
(Волгоградский государственный технический университет,
Воронежская государственная технологическая академия)
E-mail: crysmar@mail.ru

Вибротранспортные устройства для автоматической сборки с переменным характером трения (сухое – жидкостное) на несущей поверхности

Разработаны теоретические положения реализации вибрационного транспортирования плоских деталей на несущей поверхности транспортного органа путем переменного изменения сил трения (сухого – жидкостного). Такой подход обеспечивает повышение скорости вибрационного транспортирования объектов для автоматической сборки.

The theoretical realization of vibrational transportation of flat parts on the bearing surface of the vehicle of the Authority by the alternating changes of friction (dry – liquid). Such under-stroke enhances the speed of vibration transportation of objects for automation assembly.

Ключевые слова: сборка, трение, сухое, жидкостное, воздушная прослойка, разрежение, вибрационное транспортирование.

Key words: assembly, friction, dry, liquid, air space, vacuum, vibration transportation.

Ограничения, накладываемые на массу транспортируемых объектов в вибрационных транспортных устройствах, существенно лимитируют их применение в средствах автоматической сборки, особенно при перемещении приспособлений-спутников. Для разрешения этой ситуации предложена вибротранспортная система [1], где используют переменные силы трения между несущей поверхностью и транспортируемой деталью. При этом поверхность совершает гармонические колебания $x = a\sin(\omega t)$ вдоль направления транспортирования, а характер трения (сухое – жидкостное) изменяют путем попеременного создания между несущей поверхностью и деталью либо разрежения, либо воздушной прослойки (рис. 1). Для обеспечения наибольшей скорости транспортирования создание воздушной прослойки должно осуществляться в момент, когда деталь, захваченная несущей поверхностью созданным под

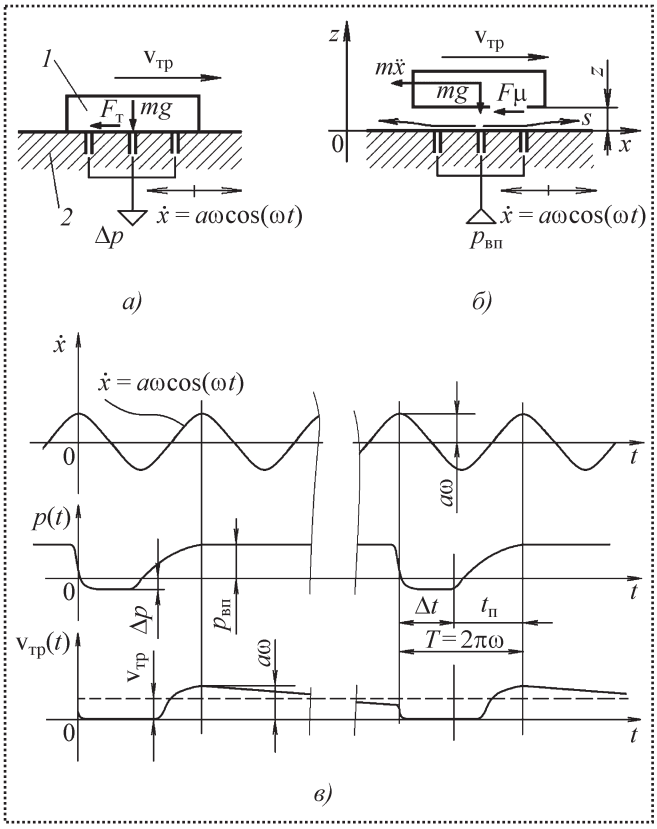

Рис. 1. Изменение сил трения между деталью и несущей поверхностью:
а – этап движения детали вместе с несущей поверхностью;
б – этап полета детали на воздушной прослойке;
в – диаграммы соответственно скорости $\dot{x}(t)$ движения несущей поверхности, скорости $v_{тр}$ транспортирования детали и закона изменения давления $p(t)$ в зазоре между деталью и несущей поверхностью

ней разрежением, достигнет вместе с поверхностью максимальной виброскорости $v^{max} = a\omega$, где a, ω – амплитуда и круговая частота колебаний несущей поверхности транспортного устройства.

Всплытие детали на воздушной прослойке и ее захват несущей поверхностью рабочего органа транспортера под действием разрежения происходят за промежуток времени $t_п$ переходного процесса, определяемый динамикой всплытия. Для реализации максимальной скорости виброперемещения определим время $t_п$, а переключение с разрежения на избыточное давление $p_{вп}$ в канале питания выполним через интервал времени Δt (его величина определяет функцию управления) от нуля датчика перемещения или ускорения (так как эти сигналы находятся в одной фазе) движения несущей поверхности.

Рассмотрим этапы (см. рис. 1, *а*, *б*) относительного движения транспортируемой детали массой m относительно несущей поверхности рабочего органа устройства. Момент времени, при котором осуществляется захват детали, соответствует случаю, когда сила трения

$$F_т = [mg + s\Delta p(t)]f = ma\omega^2 \sin(\omega t),$$

где m – масса транспортируемого объекта;

g – ускорение свободного падения;

s – площадь опорной поверхности транспортируемого объекта;

$\Delta p(t)$, f – соответственно закон изменения степени разрежения и коэффициент трения скольжения между рабочими плоскостями объекта и поверхности;

a, ω – соответственно амплитуда и круговая частота колебаний несущей поверхности в направлении транспортирования (ось OX).

При этом максимальную степень разрежения Δp^{max} выбирают из условия

$$\Delta p^{max} \geq m(a\omega^2/f_0 - g)/s,$$

где f_0 – коэффициент трения покоя между рабочими плоскостями транспортируемого объекта и несущей поверхности.

Образование воздушной прослойки представим как процесс течения воздуха через камеру переменного объема $V(t)$ с двумя турбулентными дросселями на входе и выходе (рис. 2), суммарная площадь которых

$$f_1 = \pi n d^2/4;\ f_2 = 2(a+b)z,$$

где n и d – количество и диаметр сопл, находящихся под опорной поверхностью транспортируемой детали;

$2(a + b)$ – периметр опорной поверхности транспортируемой детали с размерами a и b.

Приняв допущения, что струи воздуха в прослойке между деталью и несущей поверхностью несжимаемы и носят надкритический характер [2], а процесс является изотермическим и адиабатическим, этап всплытия детали можно описать следующим образом. Согласно расчетной схеме (см. рис. 2) всплытие $z(t)$ определяет система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m\dfrac{d(\dot z)}{dt} = [p_1(t) - p_2]ab - mg; \\ \Delta M = M_0 - M_1 = \\ = \dfrac{1}{RT}[V(t)\dfrac{dp_1(z)}{d(z)}\dot z + p_1(t)\dfrac{dV(t)}{d(t)}], \end{cases} \quad (1)$$

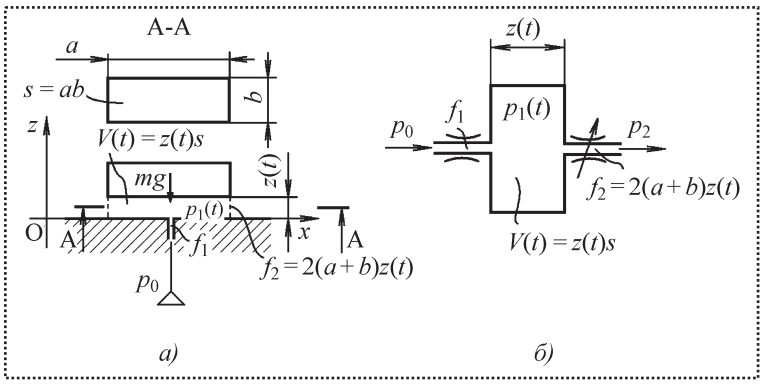

Рис. 2. Всплытие детали на воздушной прослойке:
а – механизм всплытия; *б* – эквивалентная расчетная схема

где

$$M_0 = \alpha_0 f_1 p_0 \times \sqrt{\frac{2}{RT}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_1(t)}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1(t)}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}; \quad (2)$$

$$M_1 = \alpha_1 f_2 p_1(t) \times \sqrt{\frac{2}{RT}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1(t)}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1(t)}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}; \quad (3)$$

ΔM – разность массовых расходов M_0 и M_1 на входе и выходе проточной камеры;

R = 287 Дж/кг·К – газовая постоянная;

k = 1,4 – коэффициент адиабаты;

α_0 = 0,7...0,8; α_1 = 1 – коэффициенты расхода соответственно для входного и выходного дросселей проточной камеры;

T = 293К;

ρ = 1,293 кг/м^3 [3] – плотность воздуха;

$p_0(t)$, $p_1(t)$ – абсолютное давление сжатого воздуха соответственно питания воздушной прослойки (на входе в камеру) и внутри воздушной прослойки (в камере);

p_2 – атмосферное давление.

Принимаем, что в исходный момент начальная масса воздуха в зазоре между деталью и несущей поверхностью равна нулю, а ее текущее значение $M(t) = \frac{V(t)}{RT} p_1(t)$. В конечный момент времени $t_к$ масса воздуха в сформированной воздушной прослойке $\Delta M = 0$ и ускорение $\ddot{z} = 0$. Подставив величину конечного давления $p_1(t_к) = \frac{mg}{ab} + p_2$ в уравнение ΔM = 0, получим конечное значение толщины прослойки

$$z_к = \frac{\alpha_0 f_1}{2\alpha_1 (a+b)} \sqrt{\frac{(\lambda_1)^{\frac{2}{k}-1} - (\lambda_1)^{\frac{1}{k}}}{(\lambda_2)^{\frac{2}{k}} - (\lambda_2)^{\frac{k+1}{k}}}},$$

где $\lambda_1 = \frac{p_1(t_к)}{p_0}$; $\lambda_2 = \frac{p_2}{p_1(t_к)}$,

и соответствующую ей массу воздуха

$$m_к = abz_к \rho.$$

В силу малости толщины прослойки среднее значение ее массы можно принять

$$m_{ср} = m_к / 2.$$

Тогда, допустив, что течение воздуха квазистатическое:

$$p_1(z) = m_{ср} \frac{RT}{abz},$$

получим дополнительное условие:

$$\frac{dp_1(z)}{dz} = -\frac{m_{ср} RT}{ab} \frac{1}{z^2}$$

для решения системы уравнений (1).

Преобразовав выражение (1) с учетом (2) и (3), получим новую систему уравнений:

$$p_1(t) = \left[\left\{\alpha_0 f_1 p_0 \sqrt{\frac{2}{RT}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_1(t)}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1(t)}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} - \alpha_1 f_2 p_1(t) \times \sqrt{\frac{2}{RT}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1(t)}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1(t)}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}\right\} / \dot{z} + m_{ср} / z\right] \frac{RT}{ab};$$

$$m\frac{d(\dot{z})}{dt} = [p_1(t) - p_2]ab - mg.$$

Вычисления проводили в среде Maple методом Рунге–Кутта 6...7-го порядка. Отдельный пример из полученных результатов приведен на рис. 3.

Аналогично получена система дифференциальных уравнений для захватывания детали вакуумом, создаваемым в том же зазоре между деталью и несущей поверхностью:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = [p_1(t) - p_2]s - mg; \\ \Delta M^* = M_1^* - M_0^* = \frac{V(t)}{RT}\frac{dp_1(t)}{d(t)} + \frac{p_1(t)}{RT}\frac{dV(t)}{d(t)} \end{cases}, \quad (4)$$

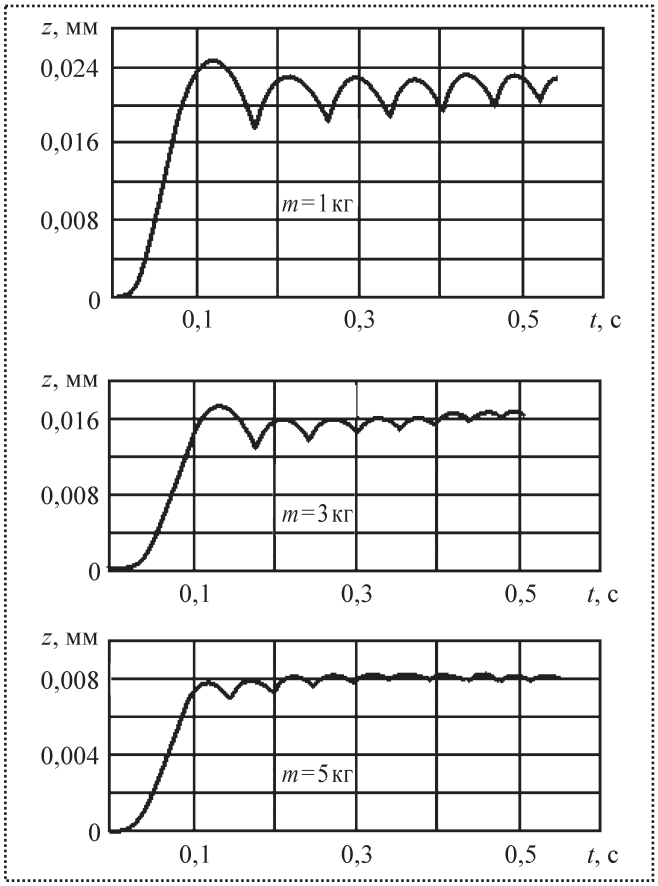

Рис. 3. Законы движения деталей при их всплытии на воздушной прослойке при давлении питания p_0 = 225 кПа

где

$$M_0^* = \alpha_1 f_2 p_2 \sqrt{\frac{2}{RT}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1(t)}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1(t)}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}; \quad (5)$$

$$M_1^* = \alpha_0 f_1 p_2 \sqrt{\frac{2}{RT}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1(t)}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1(t)}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}; \quad (6)$$

ΔM^*, M_0^*, M_1^* – соответственно разность массовых расходов и массовые расходы на входе и выходе из воздушной прослойки между деталью и несущей поверхностью.

Принято, что в исходный момент начальная масса $M_н^*$ воздуха в зазоре между деталью и несущей поверхностью

$$M_н^* = \frac{z^{max} mg}{RT},$$

ее текущее значение

$$M^*(t) = \frac{V(t)}{RT} p_1(t),$$

а конечное – $M_к^* = 0$.

Таким образом, данная модель всплытия и захватывания детали несущей поверхностью позволяет вычислить необходимые данные для управления работой транспортного устройства. Однако время $t_п$ переходного процесса может быть различно. Поэтому время Δt включения воздушной прослойки следует определять в соответствии с условием: если $t_{п1} \le \frac{2\pi}{\omega} q_1$, то $\Delta t = \frac{2\pi}{\omega} q_1 - t_{п1}$, где q_1 = 1, 2, 3 ... – количество целых периодов колебаний, в пределах которых протекает переходный процесс включения питания воздушной прослойки со временем $t_{п1}$. Значение q_1 = 1 соответствует случаю, когда время $t_{п1} < \frac{2\pi}{\omega} q_1$ (одного периода колебаний). Аналогично определяют время $t_{п2}$ отключения питания воздушной прослойки и включения вакуума.

В установившемся после всплытия детали движении с начальной скоростью $v_{тр}^{max}$, соответствующей амплитудному значению $v_{тр}^{max} = a\omega$ виброскорости несущей поверхности, закон равнозамедленного движения с учетом сил трения детали по воздушной прослойке соответствует дифференциальному уравнению

$$m\frac{dv}{dt} = -\frac{\mu s}{z_{ср}} v,$$

где μ = 1,808·10^{-5} кг/м·с – коэффициент вязкого трения воздуха;

$z_{ср}$ – средняя толщина воздушной прослойки;

v – скорость транспортирования детали.

Решение данного уравнения при условии, что в начальный момент времени скорость детали максимальна, имеет вид:

$$v = v_{тр}^{max} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right),$$

где $\tau_1 = \frac{z_{ср} m}{\mu s}$.

Задавшись коэффициентом $\varepsilon = \exp\left(-2\pi \frac{q_2}{\omega\tau_1}\right)$ снижения скорости транспортирования при движении детали на воздушной прослойке, вычислим количество q_2 периодов колебаний несущей поверхности, в течение которых осуществляется это движение:

$$q_2 = -\frac{\omega\tau_1}{2\pi}\ln\varepsilon.$$

Анализ величины q_2 показывает, что снижение скорости перемещения незначительно за достаточно большой промежуток времени. Тогда с большой степенью приближения можно считать, что средняя скорость вибротранспортирования

$$\bar{v}_{тр} = \frac{0{,}5}{(q_1 + q_2)}\{v_{тр}^{max}[1+\exp(-2\pi q_2/\omega\tau_1)]\}.$$

Предложен новый принцип вибрационного транспортирования путем управления характером сил трения, позволяющий создать новый ряд типовых быстродействующих вспомогательных устройств для автоматической сборки.

Библиографический список

1. **Пневмовакуумный** транспортер с цикловым движением симметричных рабочих органов / М.Г. Кристаль, В.В. Филимонов, И.А. Смирнов, А.В. Широкий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2002. № 10. С. 26—27.
2. **Абрамович Г.Н.** Теория турбулентных струй. М.: Наука 1984. 716 с.
3. **Физические** величины: Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

УДК 622.692.4

Ю.Г. Лапынин, А.Н. Макаренко, А.А. Архипов
(Волгоградский колледж газа и нефти ОАО "Газпром")
E-mail: y.lapynin@mail.ru

Универсальное оборудование для присоединения патрубков к аппаратам, находящимся под давлением

Предлагаемое универсальное технологическое оборудование для присоединения патрубков различного диаметра к аппаратам, находящимся под давлением (резервуары, действующие трубопроводы и т.п.), может применяться в полевых условиях и на промышленных объектах, транспортирующих нефть, газ, воду, пар. Использование данного оборудования не требует отключения трубопровода и остановки действующих объектов, что ведет к экономии времени и денежных средств.

The offered universal process equipment being under pressure (the tanks, operating pipelines, etc.) can be applied to joining of branch pipes of various diameters to designs in field conditions and on the industrial targets which are engaged in transportation of oil, gas, water, pair. Use given the process equipment does not demand switching-off of the pipeline and a stop of operating objects that conducts to economy of time and money.

Ключевые слова: присоединение патрубков, нефть, газ, вода, пар.

Key words: joining of branch pipes, oil, gas, water, steam.

Современные технологии и специальное оборудование позволяют проводить присоединения к аппаратам, находящимся под давлением (трубе, резервуару) без прерывания или остановки производственного процесса [1, 2]. Наиболее часто врезку (присоединение) под давлением применяют для проведения ремонта или модернизации систем труб на действующих трубопроводах. Данную технологию можно использовать для врезки в трубопроводы, поставляющие природный газ, пар, воду, нефть при различных параметрах сред.

Для присоединения к аппаратам, находящимся под давлением, могут использоваться различные способы. Один из них предполагает приваривание на трубопровод тройника с фланцем, в котором затем монтируется заглушка. Это дает возможность не оставлять на трубопроводе задвижку. Затем на тройник ставят временную задвижку, на которую монтируют машину для врезки, и в задвижке фрезеруют отверстие. При этом образованный купон остается на направляющем сверле. После завершения врезки в трубопровод фреза прячется в адаптер, а задвижка закрывается.

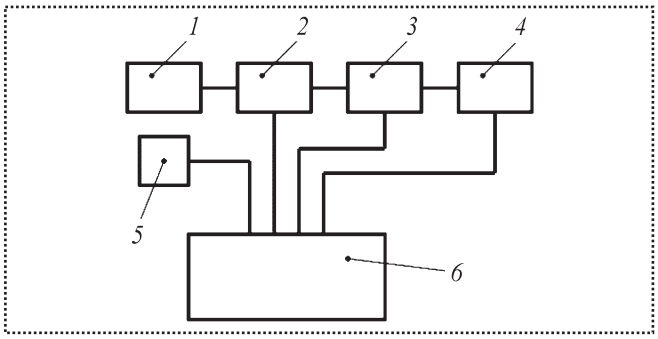

Рис. 1. Принципиальная схема врезки в трубопровод под давлением:
1 — рабочий орган;
2 — приводной механизм;
3 — устройство аккумуляции энергии;
4 — механизм поступательного перемещения рабочего органа;
5 — система блока датчиков;
6 — блок управления

При помощи оборудования, которое использовали для обработки отверстия, устанавливают заглушки во фланец тройника. Затем демонтируют задвижки, после чего тройник закрывают глухим фланцем. Выбор специального оборудования для проведения врезки в трубопровод под давлением зависит от материала трубы, а также от ее диаметра и рабочего давления.

Разработанное оборудование объединяет инновационные решения, на некоторые из которых подана заявка на выдачу патента РФ на изобретение. Основная задача – разработка высокотехнологичного оборудования, позволяющего работать с максимальной безопасностью и производительностью.

Принципиальная схема предлагаемого универсального оборудования [3] представлена на рис. 1. Рабочий (исполнительный) орган *1* приводится во вращение приводным механизмом *2* и поступательно перемещается механизмом *4* к аппарату *3* (трубе, резервуару), в котором необходимо выполнить отверстие. Блок системы управления *6* контролирует работу приводных механизмов (вращательного и поступательного) и по сигналу системы датчиков *5* отключает данные механизмы и включает/отключает систему аккумуляции.

Оборудование для реализации предлагаемой схемы состоит из двух частей: оригинального устройства для врезки в действующий трубопровод и насосной станции. Врезка отвода осуществляется в любом горизонтальном положении оси трубопровода.

На рис. 2 представлен общий вид универсального оборудования для присоединения к конструкциям, находящимся под давлением, на рис. 3 – варианты устройства с индивидуальной связью фиксаторов упорами с корпусом (*а*) и опорно-центрирующего механизма устройства врезки с установкой ролика посредством упругого элемента (*б*).

Универсальное оборудование *1* для присоединения к конструкциям, находящимся под давлением (см. рис. 2), содержит установленный на трубопроводе патрубок *2*, задвижку *3*, герметичный корпус *4*, вал *5* с размещенным на нем режущим элементом *6*, приводные механизмы *7* и *8* возвратно-поступательного движения и вращения, центрирующий механизм *9* в виде корпуса *10* с установленными на нем фиксаторами *11* с возможностью взаимодействия с внутренними поверхностями патрубка *2*, задвижки *3*, корпуса *4* за счет упоров *12*, связанных с фиксаторами *11* и корпусом *10*, причем вал *5* режущего элемента *6* приводится во вращение приводным механизмом *8* вращения, связанным с корпусом *10*, который связан с герметичным корпусом *4* приводным механизмом *7* возвратно-поступательного движения таким образом, чтобы в сложенном состоянии его крайняя точка *13* (или крайние точки режущего элемента *6* или механизма захвата для вырезанного из трубы участка *14*) перемещающихся частей *15* (включают в себя вал *5* с режущим элементом *6*, приводной механизм *8*, центрирующий механизм *9* и т.п.) со стороны трубопровода *1* могла находиться в герметичном корпусе *4*.

Возможна работа центрирующего механизма *9* при расположении на концах фиксаторов опорной поверхности *16* и (или) по одному ролику *17*, фиксаторы *11* должны располагаться в два ряда (по три в каждом ряду). Причем для корректировки оси возможна установка упора *12* на каждый фиксатор *11*, возможна работа

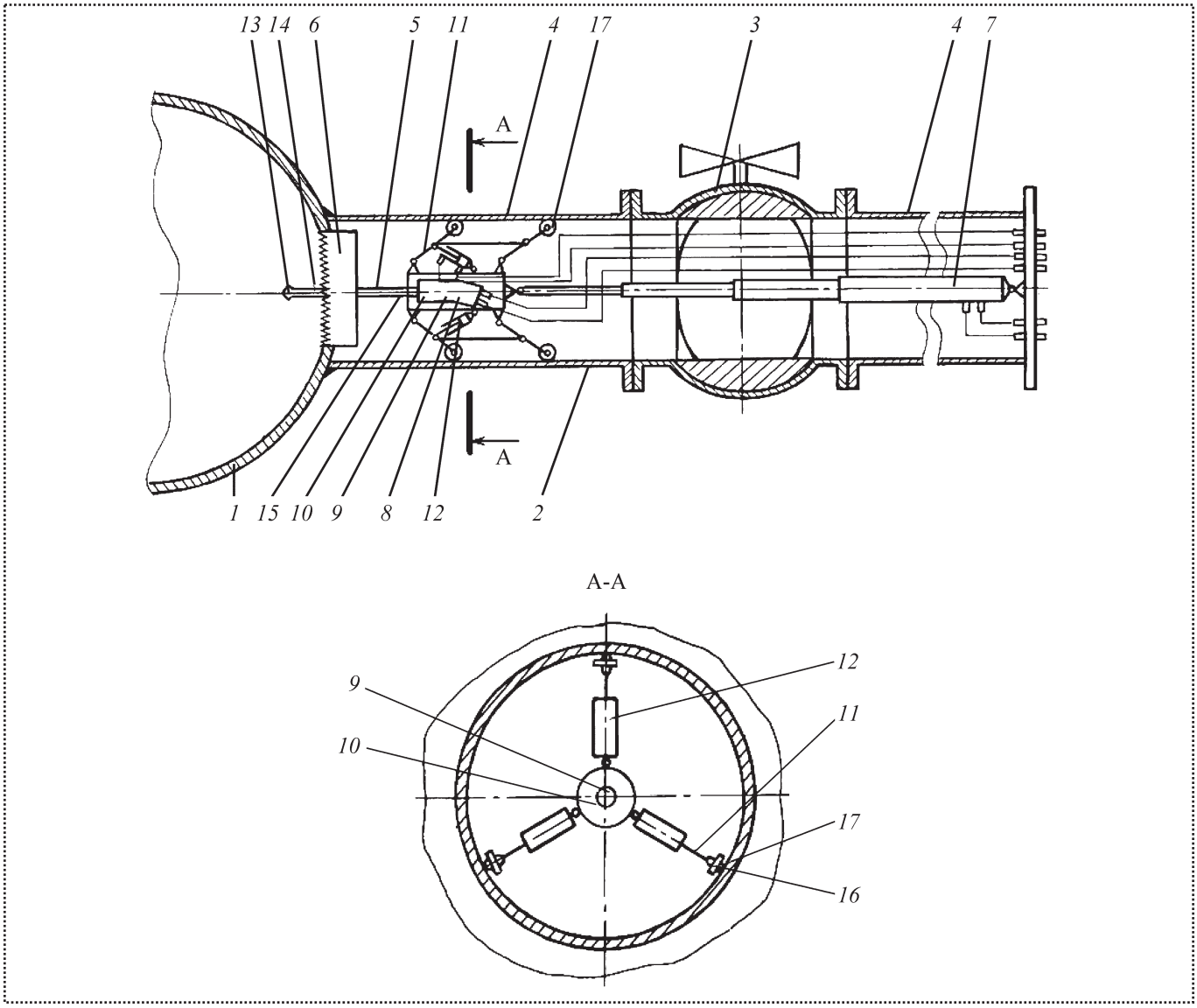

Рис. 2. Общий вид устройства для врезки в действующий трубопровод

центрирующего механизма *9* при расположении фиксаторов хотя бы в один ряд хотя бы с двумя фиксаторами в ряду. В этом случае используются развитые опорные поверхности *16* с несколькими роликами *17* на каждой из них. Ролик может устанавливаться упруго посредством элемента *18* с возможностью утапливания относительно опорной поверхности и взаимодействия последней с внутренней поверхностью патрубка для надежного центрирования.

Главная особенность предлагаемого оборудования – применение пневмогидроаккумуляторов. Гидравлическое оборудование отвечает современной концепции проведения подготовительных, аварийных и ремонтных работ, не требует квалифицированного персонала, повышает производительность, позволяет более оперативно реагировать на возникающие аварийные ситуации, уменьшает трудоемкость ручного труда, затраты времени, повышая в конечном итоге эффективность производства.

Разработанный пневмогидравлический привод имеет ряд преимуществ:

– максимальная безопасность для оператора;

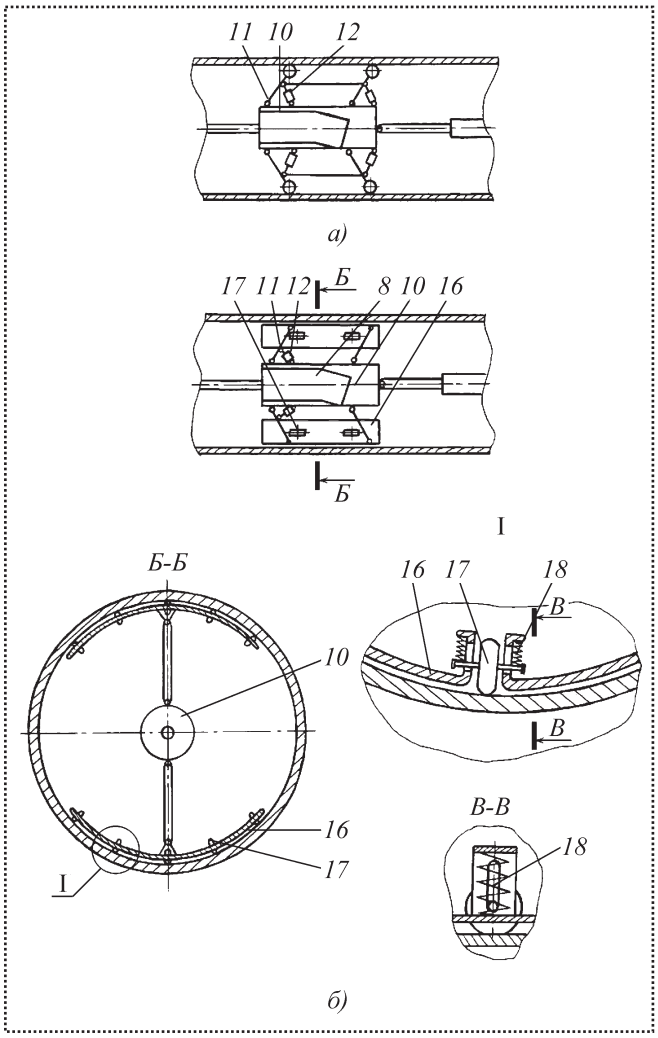

Рис. 3. Варианты устройства с индивидуальной связью фиксаторов упорами с корпусом (*а*) и опорно-центрирующего механизма устройства врезки с установкой ролика посредством упругого элемента (*б*)

– больше мощность — больше производительность;

– низкий уровень шума;

– незначительная масса;

– универсальность источников энергии: мобильные маслостанции, гидроприводы;

– взрывобезопасность;

– отсутствие выброса отработавших газов, пыльных облаков, электрошока;

– использование инструмента под водой и при низких температурах;

– возможность осуществления привода при отключенной маслостанции за счет накопленной энергии;

– уменьшение вероятности поломки режущего инструмента за счет демпфирования динамических нагрузок пневмогидроаккумуляторами.

Средства механизации, предлагаемые для создания устройства врезки в действующий трубопровод, можно успешно эксплуатировать на предприятиях топливно-энергетического комплекса, транспорта, жилищно-коммунального хозяйства, строительного комплекса, связи.

Универсальное оборудование для присоединения патрубков к аппаратам, находящимся под давлением, можно транспортировать в кузове легкого грузовика или пикапа и обслуживать 1...2 операторами. Пневмогидравлический привод безотказно работает при температуре до –49 °С.

Использование данной оснастки позволяет:

• повысить качество присоединения деталей с различным внутренним диаметром (возможно с переменным) к аппаратам, работающим под давлением;

• повысить производительность труда на предприятиях, занимающихся ремонтом и текущим обслуживанием трубопроводов;

• обеспечить герметичность врезки, безопасность обслуживающего персонала;

• исключить загрязнение окружающей среды, отключение трубопровода и остановку технологического оборудования.

Внедрение предлагаемого оборудования сократит сроки и затраты на проведение ремонтных работ на трассе, уменьшит нормативные потери газа и повысит качество управления процессом его транспортировки без остановки технологического оборудования.

Библиографический список

1. **Оригинальное** устройство для врезки в действующий газопровод / Ю.Г. Лапынин, А.Н. Макаренко, А.А. Архипов и др. // Альманах–2009. Волгоград: изд-во ВолГУ, 2009. С. 153–159.

2. **Лапынин Ю.Г., Макаренко А.Н.** Механизм для врезки в действующий газопровод // Россия периода реформ. XIII Междунар. отрасл. науч.-практ. конф. Волгоград, 20–22 мая 2009 г. Волгоград: изд-во ВолГУ, 2009. С. 192–195.

3. **Патент** РФ № 2221960, МПК[7] F16L41/04. Установка для врезки отводов в трубопровод / Р.С. Янышев // Б.И. 2004, № 33.

УДК 621.88.084

И.В. Абрамов, *д-р техн. наук, профессор,* **А.И. Абрамов,** *канд. техн. наук, доцент,*
А.Н. Синицын, В.В. Синицына, *ст. преподаватели*
(Ижевский государственный технический университет)
E-mail: ms@istu.ru

Теоретическое обоснование новых способов сборки и разборки соединений с натягом

Теоретически обоснована возможность разработки новых методов сборки и разборки соединений с натягом с применением центробежных сил и приложением изгибающего момента с вращением. Приведены результаты исследования методом конечных элементов влияния частоты вращения и изгибающей нагрузки на контактные давления в зоне посадки. Определены характеры зависимостей контактного давления от частоты вращения и изгибающего момента.

Possibility of interference fit assembling and disassembling methods development is theoretically proved. Influence of rotating frequency and bending moment on contact pressure of interference fit is investigated by finite element method. Characters of relationships between contact pressure and rotating frequency and bending moment are determined.

Ключевые слова: соединение с натягом, метод конечных элементов, изгибающий момент, частота вращения.

Key words: interference fit, pressure coupling, bearing capacity, bending moment, finite element method (FEM).

Известны различные способы сборки и разборки соединений с натягом: механический, тепловой, гидропрессовый и др. Каждый из них обладает достоинствами и недостатками и находит применение в машиностроении. Однако для решения проблемы ресурсосбережения необходимо совершенствование существующих и изыскание новых способов.

В работе [1] показано, что приложение изгибающей нагрузки к выступающей части вала приводит к перераспределению контактных давлений на торце соединения, а это может явиться причиной раскрытия стыка соединения. В работе [2] рассмотрен случай полной потери нагрузочной способности при значительных частотах вращения.

В данной статье оценим возможность сборки и разборки соединений с натягом с применением центробежных сил и приложением изгибающего момента с вращением. Для исследования соединения термооправки цилиндрического типа и цельной торцевой фрезы используем метод конечных элементов. Термооправка DIN69871-ADB 5800 с наружным диаметром d_2 = 28 мм, фреза с диаметром хвостовика d_{m_m} =10 мм и длиной l_2 = 62 мм производителя SECO (рис. 1). С учетом рекомендаций производителя термооправки [3] выбрана посадка P6/h5, для которой минимальный натяг составляет $N_{\min}$ = 6 мкм.

Для материала термопатрона (инструментальная сталь 4Х5МФС) предел текучести $\sigma_т$ = 1 480 МПа, предел прочности

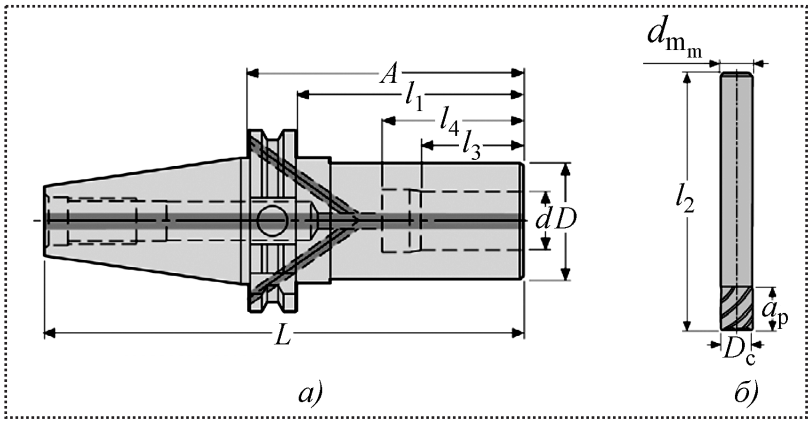

Рис. 1. Термооправка (*а*) и цельная твердосплавная фреза (*б*)

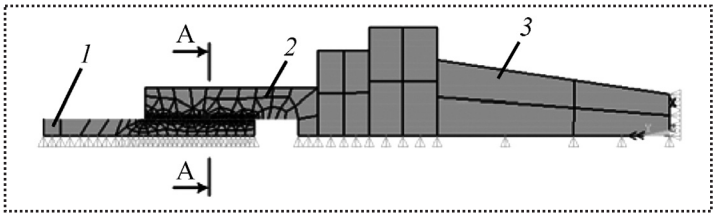

Рис. 2. Схема деления деталей соединения с натягом на конечные элементы при моделировании вращения:
1 – фреза;
2 и *3* – зажимная и конусная часть термопатрона

$\sigma_в$ = 1 750 МПа, модуль упругости E_1 = = $2 \cdot 10^{11}$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_1 = 0{,}3$, плотность ρ = 7 750 кг/м^3. Материал фрезы – твердый сплав Т15К6, прочность на изгиб 1 200 МПа, модуль упругости E_2 = = $5{,}2 \cdot 10^{11}$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_2 = 0{,}3$, плотность ρ = 11 500 кг/м^3.

При исследовании влияния частоты вращения на контактные давления в зоне посадки рассматриваем соединение с натягом с максимальной длиной сопряжения деталей l_c = 32 мм. В работе [2] при моделировании вращения соединения использовали сетку из 680 осесимметричных элементов (рис. 2). Контактные давления рассматривали в характерном сечении А–А. Результаты вычислений представлены на рис. 3.

При увеличении частоты вращения контактное давление и, соответственно, натяг в соединении снижаются равномерно по всей поверхности контакта. Уменьшение натяга объясняется тем, что под действием центробежных сил охватывающая деталь расширяется больше, чем охватываемая, так как находится дальше от оси вращения. Когда натяг снижается почти до нуля, происходит распрессовка соединения.

Таким образом, распрессовку соединений с натягом можно провести с помощью вращения без дополнительных нагрузок. Распрессовка опытных соединений с длиной сопряжения l_c = 32 мм с натягом N_{min} = 6 мкм происходит при частоте 80 000 об/мин.

Рассмотрим влияние изгибающего момента на величину раскрытия стыка для соединения с минимальным натягом N_{min} = = 6 мкм и длиной сопряжения l_c = 10 мм. Задача определения напряженно-деформированного состояния при нагружении изгибающим моментом является несимметричной и требует объемного моделирования (рис. 4). Для оптимизации времени расчета частью термопатрона можно пренебречь, оставив только его зажимную часть.

В соединении с натягом без приложения внешней нагрузки контактные давления равномерно распределены по поверхности контакта (рис. 5, *а*). Приложение изгибающей нагрузки M = 11,4 Н·м приводит к раскрытию стыка, т.е. образованию зазора вследствие уменьшения давления до нуля (рис. 5, *б*). При дальнейшем увеличении изгибающего момента площадь раскрытия стыка и зазор увеличиваются (рис. 5, *в*, *г*). Зависимость зазора от изгибающего момента в условиях отсутствия

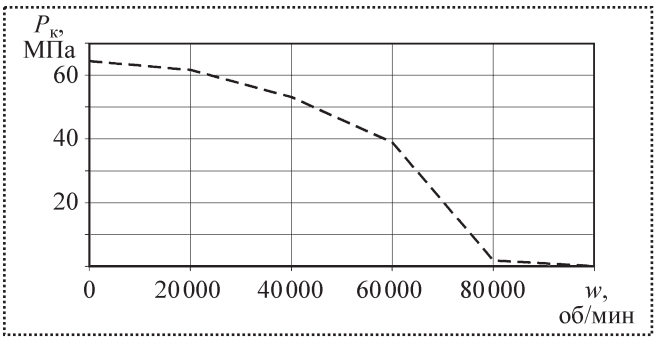

Рис. 3. Зависимость контактного давления $p_к$ в соединении от частоты вращения w при натяге N_{min} = 6 мкм

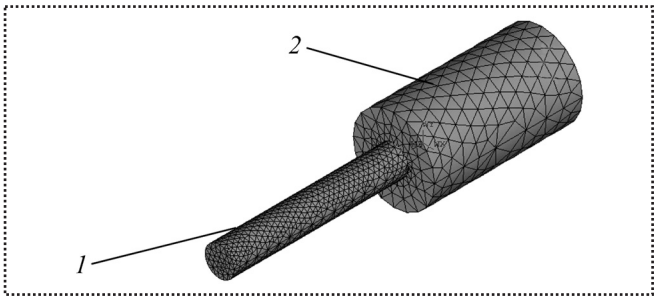

Рис. 4. Схема деления деталей соединения с натягом на конечные элементы при нагружении изгибающим моментом и вращением:
1 – фреза; *2* – зажимная часть термопатрона

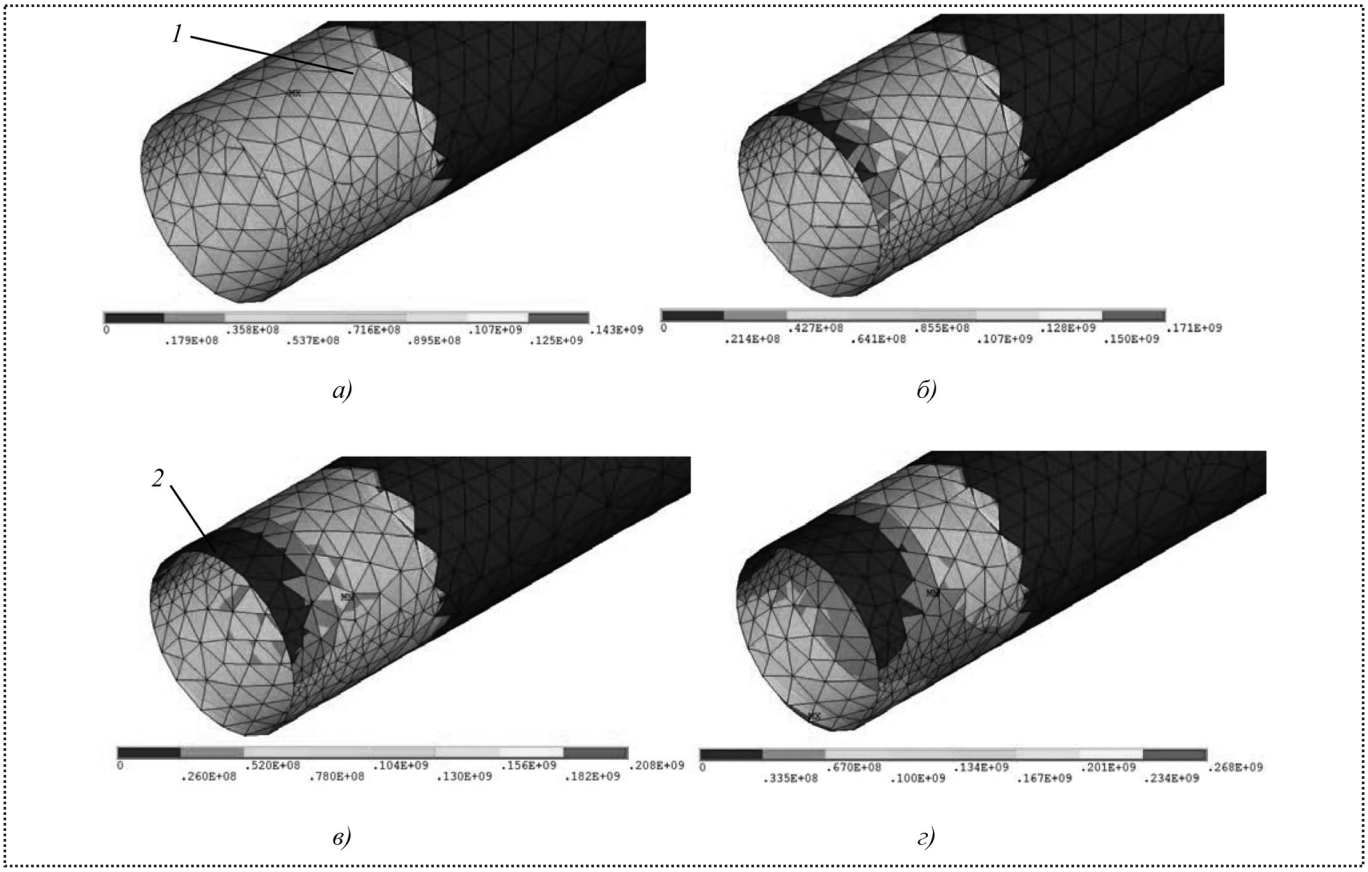

Рис. 5. Контактные давления при различных изгибающих моментах без вращения:
а – M = 0; *б* – M = 11,4 Н·м; *в* – M = 22,8 Н·м; *г* – M = 34,2 Н·м

вращения представлена на рис. 6. Зазор анализируется у торца соединения в т. *2* (см. рис. 5).

На рис. 6 видно, что зависимость зазора у торца соединения с натягом от изгибающего момента нелинейна.

Следует отметить, что статическое воздействие изгибающей нагрузки не приводит к самораспрессовке соединений с натягом, так как суммарная величина сил трения остается постоянной [4]. При уменьшении контактного давления у нагружаемого торца соединения давление увеличивается ниже оси симметрии и у противоположного торца (см. рис. 5, *б–г*).

Исследование влияния одновременного воздействия изгибающей нагрузки и вращения на контактные давления проводим также для соединения с натягом $N_{\min}$ = 6 мкм и длиной сопряжения l_c = 10 мм (см. рис. 4). Анализируем контактные давления для пяти изгибающих моментов при различных частотах вращения. Для анализа используем контактные давления в средней зоне контакта (т. *1* на рис. 5, *а*). Предполагаем, что уменьшение до нуля контактных давлений в рассматриваемой зоне приводит к распрессовке соединений с натягом.

Результаты исследований представлены на рис. 7. Видно, что контактные давления

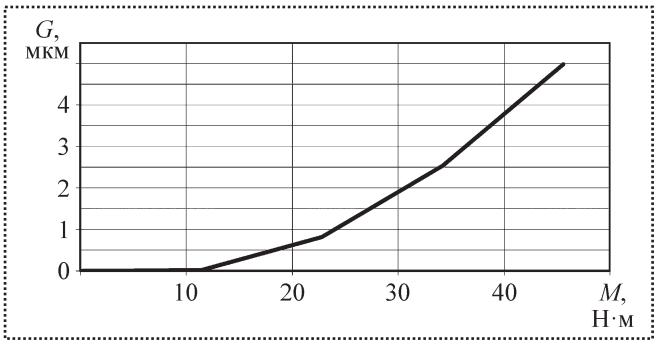

Рис. 6. Зависимость зазора *G* у торца соединения с натягом от изгибающего момента *M* без вращения

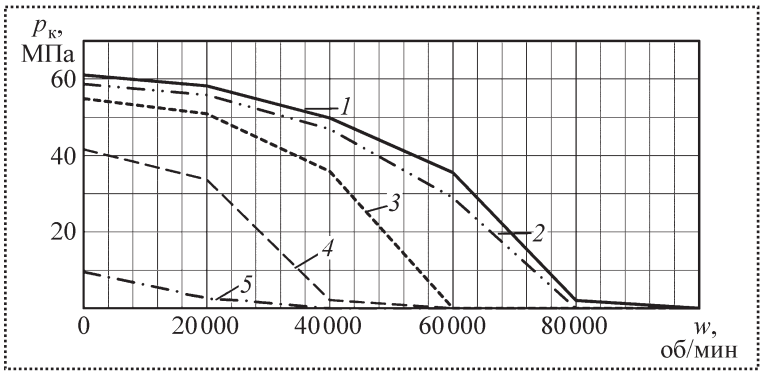

Рис. 7. Зависимость контактного давления $p_к$ в средней зоне соединения от частоты вращения w при различных изгибающих моментах:
1 – M = 0; *2* – M = 11,4 Н·м; *3* – M = 22,8 Н·м; *4* – M = 34,2 Н·м; *5* – M = 45,6 Н·м

уменьшаются при приложении изгибающей нагрузки даже без вращения. Это объясняется перераспределением контактных давлений и раскрытием стыка у торца соединения с натягом.

Комплексное воздействие изгибающего момента и вращения приводит к снижению требуемой для распрессовки частоты вращения. С увеличением изгибающего момента уменьшение до нуля контактного давления в средней зоне соединения наступает при меньших скоростях вращения. Так, например, распрессовка соединения с натягом 6 мкм без изгибающего момента происходит при 80 000 об/мин, а при M = 45,6 Н·м – при 40 000 об/мин. При постоянной частоте вращения зависимость контактных давлений в средней зоне соединения от изгибающего момента нелинейна (рис. 8). Так, при скорости вращения соединения 20 000 об/мин и увеличении изгибающего момента в 4 раза контактные давления уменьшаются в 19,44 раза.

С увеличением частоты вращения контактные давления в характерной точке уменьшаются до нуля. Повышение частоты вращения при постоянном изгибающем моменте приводит к росту площади раскрытия стыка (рис. 9).

Зависимость зазора от частоты вращения в условиях постоянного изгибающего момента представлена на рис. 10 (зазор анализируется у торца соединения в т. *2* рис. 5). Видно, что зависимость зазора у торца соединения с натягом от частоты вращения нелинейна при постоянном изгибающем моменте.

Согласно рис. 7 одной из возможных комбинаций изгибающего момента и частоты вращения, необходимой для распрессовки соединений с натягом, является воздействие моментом M = 45,6 Н·м при частоте w = = 40 000 об/мин. Такой момент соответствует

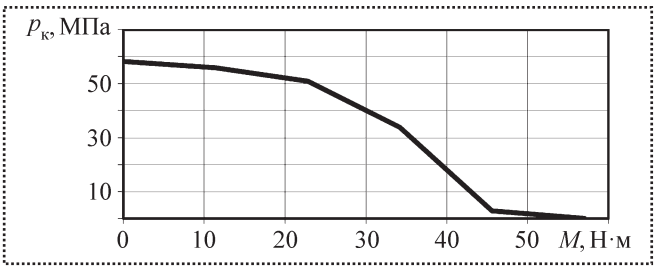

Рис. 8. Зависимость контактного давления в средней зоне соединения от изгибающего момента M при частоте вращения 20 000 об/мин

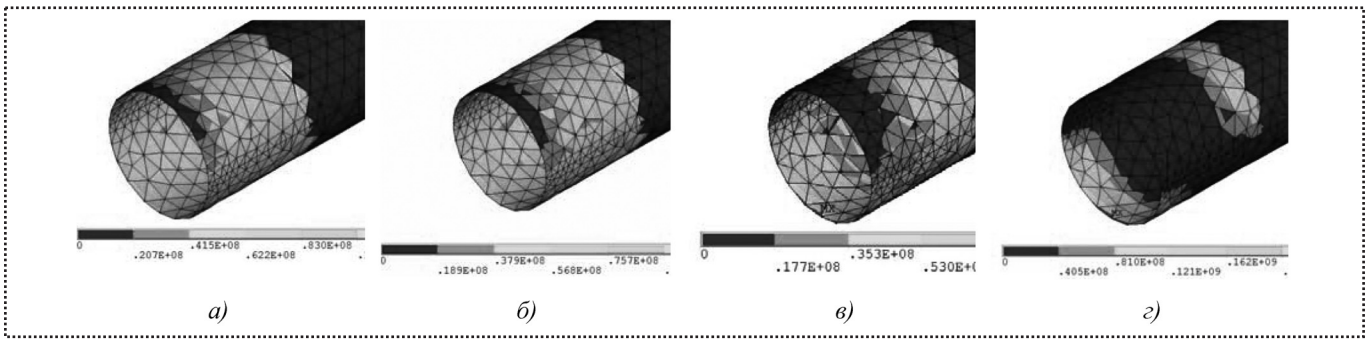

Рис. 9. Изменение контактных давлений при M = 11,4 Н·м и различных частотах вращения:
а – w = 20 000 об/мин; *б* – w = 40 000 об/мин; *в* – w = 60 000 об/мин; *г* – w = 80 000 об/мин

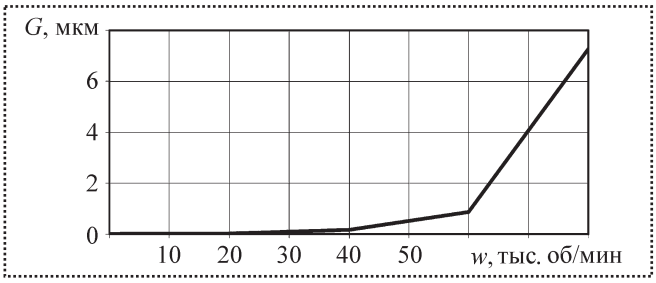

Рис. 10. Зависимость зазора *G* у торца соединения с натягом от частоты вращения *w* при постоянном изгибающем моменте *M* = 11,4 Н·м

силе 800 Н при длине выступающей части вала 52 мм. Для распрессовки данного соединения осевой нагрузкой потребуется сила 3 391 Н.

Таким образом, распрессовка соединений с натягом путем приложения изгибающих нагрузок с вращением позволит снизить требуемые усилия в 5,88 раз. К достоинствам данного метода относится то, что в процессе распрессовки не повреждается поверхность контакта, исключаются задиры.

Таким образом, теоретически показана возможность разработки новых методов:

– сборки и разборки соединений с натягом на основе создания монтажного зазора с применением центробежных сил при вращении. Зависимость контактного давления в зоне посадки от частоты вращения соединения имеет нелинейный характер, что необходимо учитывать при выборе технологических параметров;

– разборки соединений с натягом на основе приложения изгибающего момента с вращением. При постоянной частоте вращения зависимость контактных давлений в средней зоне соединения от изгибающего момента нелинейна. Полученная зависимость является основанием для выбора частоты вращения и изгибающего момента, необходимых для разборки соединений с натягом.

Библиографический список

1. **Абрамов И.В., Абрамов А.И., Синицын А.Н., Синицына В.В.** Напряженно-деформированное состояние деталей соединения с натягом под действием изгибающего момента. // Вестник машиностроения. 2010. № 8. С. 18–21.

2. **Абрамов И.В., Синицына В.В.** Влияние частоты вращения на несущую способность соединений с натягом // Материалы Третьей научно-исследовательской конференции студентов, магистрантов и аспирантов факультета "Управление качеством" ИжГТУ. Ижевск: изд-во ИжГТУ, 2010. С. 209–212.

3. **Цельные** концевые фрезы. Каталог и техническое руководство Seco tools. 2008.

4. **Гречищев И.С., Ильяшенко А.А.** Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.

АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА: справочник

И.Х. Стратиевский, В.Г. Юрьев, Ю.М. Зубарев

2010. – 352 с.: ил. ISBN 978-5-94275-522-5 **Цена 700 р.**

Содержит данные об основных видах современных абразивных инструментов, выборе их характеристик и подготовке к эксплуатации. Для наиболее распространенных способов абразивной обработки приведены рекомендации по режимным параметрам, применяемому оборудованию и технологической оснастке, смазывающим технологическим средствам, оценке эксплуатационных свойств инструментов. Учтены изменения в стандартах, произошедшие в последние годы.

Предназначен для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторов и технологов, студентов и преподавателей высшего и среднего профессионального образования.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.396.6.002.72

В.Г. Ковалёв, *д-р техн. наук, профессор (МГТУ им. Н.Э. Баумана),*
С.В. Ковалёв, *канд. техн. наук, профессор (ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова)*
E-mail: ksv.ipu@bk.ru

Применение расчетных параметров инструмента для совершенствования процесса электромонтажа накруткой

Представлены обоснованные величины силовых параметров процесса электромонтажа накруткой: силы натяжения провода, прижима витков одного к другому и сила, определяющая мощность электропривода устройства для накрутки. Ранее полученные результаты уточнены.

The first justifiable measure of power parameters of wiring wire: tensile wires, power rabbit turns one to another and the power of defining power devices for cheating. Previously obtained results clarified.

Ключевые слова: накрутка, натяжение, провод, прижим, мощность, сечение вывода.

Key words: churning, tension wire, pressure, power, output section.

Силу P осевого натяжения провода, обеспечивающую врезание вывода в проводник, при накрутке с учетом реальных физических условий определим на основе ранее полученного в работе [1] выражения*:

$$P = \frac{\pi\sigma_т}{r+0{,}5d}\left(1+\mu\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{d}{2}\right)^3, \qquad (1)$$

где $\sigma_т$ – предел упругости материала проводника;

$\mu \approx 0{,}15$ – коэффициент трения круглого проводника по тороидальной поверхности накручивающего валика;

d – диаметр проводника;

r – радиус рабочей кромки накручивающего валика.

Из этого выражения следует, что с уменьшением r увеличивается осевое натяжение проводника. Следовательно, с помощью этого параметра можно управлять натяжением проводника и величиной поверхности его контакта с выводом.

Для определения других силовых параметров технологического процесса, необходимых для расчета инструмента-устройства для накрутки, рассмотрим рис. 1. В осевом разрезе изгиба и спрямления витка провода (рис. 1, *а*) показаны необходимые параметры при накрутке первого витка у основания вывода – радиус рабочей кромки накручивающего валика, диаметр проводника и приближенный угол контакта α.

При накрутке второго и последующих витков у четвертой стороны вывода наибольшие величины угла γ наклона витка и силы его натяжения к плоскости, перпендикулярной оси вывода, а также вертикальной $P_в$ и горизонтальной $P_г$ составляющих силы натяжения провода найдем из рис. 2:

$$\gamma = \mathrm{arctg}\frac{d}{a+d}, \qquad (2)$$

$$P_в = P\sin\gamma; \qquad (3)$$

$$P_г = P\cos\gamma, \qquad (4)$$

где a – размер стороны квадратного вывода.

В процессе накрутки с целью предупреждения нахлеста витков $P_в$ не должна превышать

* **Ковалёв С.В., Ковалёв В.Г.** Основные расчетные параметры электромонтажа методом накрутки // Компоненты и технологии. 2008, № 8. С. 14–18.

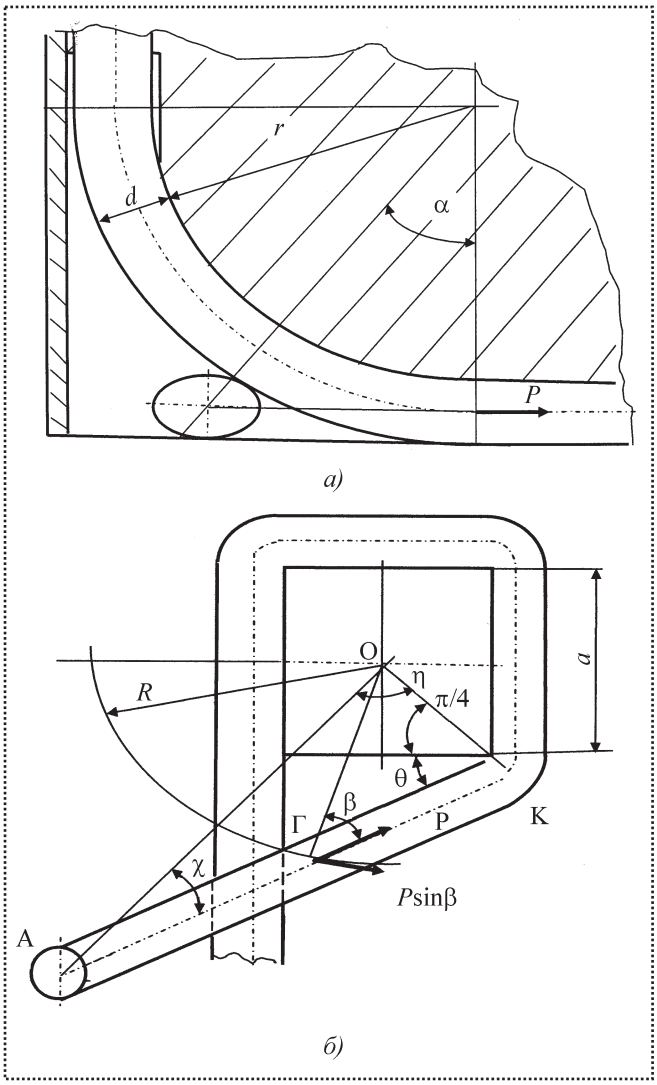

Рис. 1. Эскизы к определению параметров накрутки:
а – начального и промежуточного угла α контакта проводника с ранее уложенной его частью;
б – силовых параметров

осевую силу прижима витков друг к другу, создаваемую накручивающим устройством. Следовательно, усилие сжатия пружины $P_{пр}$ механизма накрутки не должно превышать величину вертикальной составляющей силы накрутки:

$$P_{пр} \le P_{в}. \qquad (5)$$

Для определения окружной силы и ее действия на провод и вывод в процессе накрутки необходимо определить углы χ и β (рис. 1, *б*)

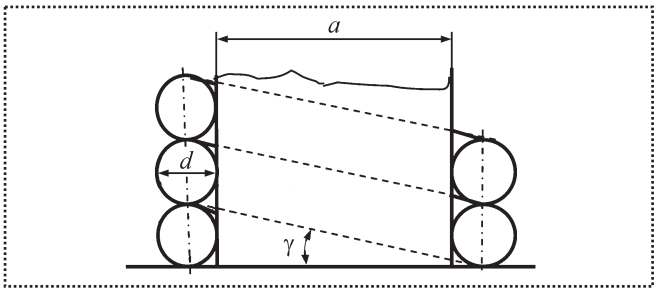

Рис. 2. Схема к определению угла γ

в косоугольных треугольниках АОК и ГОК. В треугольнике АОК известны длины сторон

$$OA = c + r + 0{,}5d;$$

$$OK = c + 0{,}5d;$$

$$\text{угол } ОКГ = \pi/4 + \theta.$$

В треугольнике ГОК сторона ОГ = = ГК = АК – *r*.

На основе теоремы синусов для косоугольного треугольника из треугольника АОК получим

$$\sin\chi = \frac{c+0{,}5d}{c+0{,}5d+r}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\theta\right), \qquad (6)$$

где $c = 1{,}41a/2$ – половина диагонали квадратного поперечного сечения вывода;

θ – угол наклона витка к стороне квадрата (рис. 1, *б*), периодически изменяющийся от π/2 до 0 у каждой из сторон.

На рис. 3 показана зависимость sinχ от радиуса *r* при θ = 0 и π/2, на рис. 4 – зависимость sinχ от θ при *r* = 2 , из которой следует, что sinχ имеет наибольшую величину при θ = π/4.

Полная величина окружной составляющей силы натяжения (см. рис. 1, *б*) на выходе из тороидальной кромки накручивающего валика

$$P_{ок} = P\sin(\beta), \qquad (7)$$

а горизонтальная составляющая этого усилия, определяющая крутящий момент в плоскости,

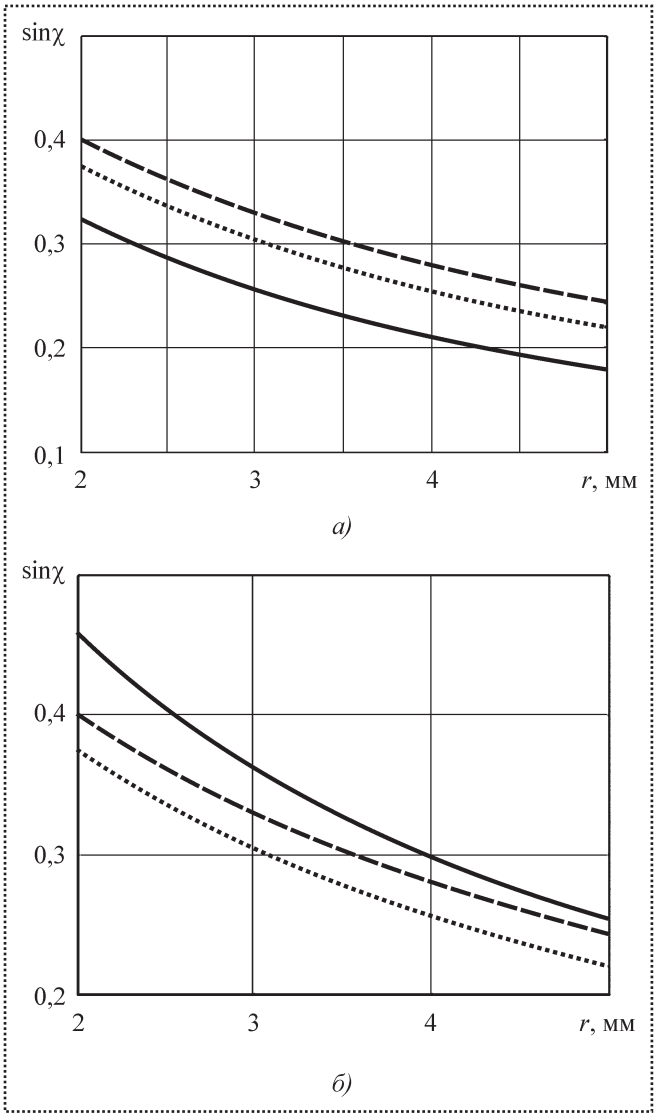

Рис. 3. Зависимость sinχ от радиуса *r* при θ = 0 (*а*) и θ = π/2 (*б*):
— – *a*/*d* = 1,7; ..... – *a*/*d* = 2,5; – – – – *a*/*d* = 3

перпендикулярной оси вывода, должна учитывать наклон $P_{ок}$:

$$P_{дв} = P_{ок}\cos\gamma = P\sin\beta\cos\gamma. \qquad (8)$$

Здесь sinβ определяет выражение (13).

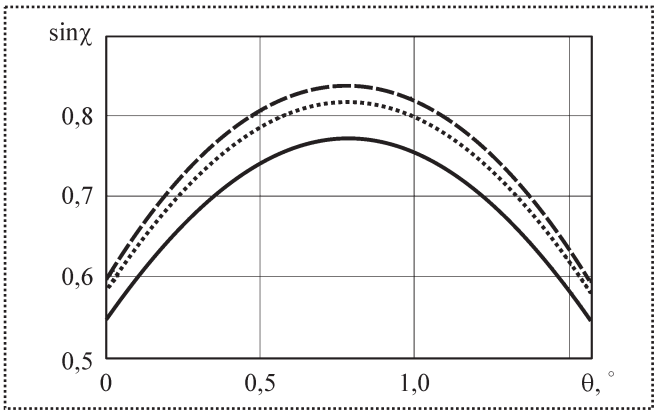

Рис. 4. Зависимость sinχ от угла θ:
— – *c*/*d* = 1,7; ..... – *c*/*d* = 2,5; – – – – *c*/*d* = 3

Из треугольника АОК с учетом теоремы синусов

$$AK = (c + 0{,}5d + r)\frac{\sin\eta}{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)}; \qquad (9)$$

$$\eta = \frac{3}{4}\pi - \theta - \chi; \qquad (10)$$

$$\chi = \arcsin\chi. \qquad (11)$$

Так как параметры *a* и *r* линейно зависят от диаметра проводника *d*, то характер зависимости arcsinχ от *a* и *r* будет таким же. Это относится и к изменению окружного усилия накрутки. На рис. 5 показан характер зависимости максимального усилия накрутки, действующего на валик. Как видно, это усилие постоянно при выбранном диаметре вывода.

Для определения мощности привода необходимо найти крутящий момент. С этой целью вычислим плечо усилия накрутки – радиус его действия *R*. На основе теоремы косинусов найдем:

$$R = \sqrt{(c + 0{,}5d)^2 + \left[(c + r + 0{,}5d)\frac{\sin\eta}{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)} - r\right]^2 - 2(c + 0{,}5d)\left[(c + r + 0{,}5d)\frac{\sin\eta}{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)} - r\right]\cos\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)}. \qquad (12)$$

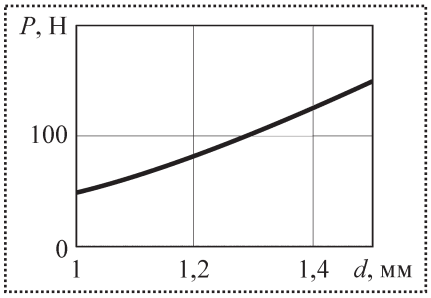

Рис. 5. Зависимость усилия накрутки от диаметра проводника

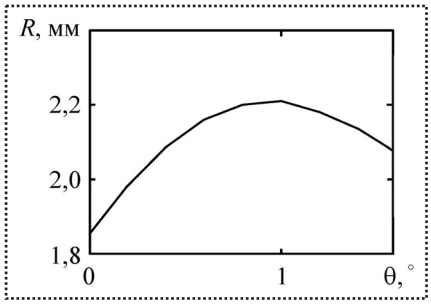

Рис. 6. Зависимость радиуса *R* от угла θ

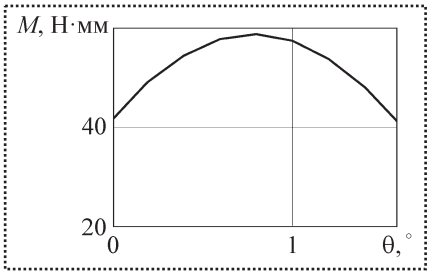

Рис. 7. Зависимость крутящего момента от угла θ

Из теоремы синусов

$$\sin\beta = \frac{c+0{,}5d}{R}\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right). \qquad (13)$$

На рис. 6 показана зависимость радиуса R от угла θ. Как видно, процесс перехода накрутки от одной стороны квадрата вывода к другой сопровождается скачкообразным уменьшением R от ~ 2,1 при $\theta = 0$ до ~ 1,85 при $\theta = \pi/2$.

Расчет стороны квадрата вывода основывается на прочности его материала. Используем соответствующие процессу кручения формулы из теории расчетов на прочность, определяющие предельные крутящий момент и угол закручивания:

$$M = \alpha a^3[\tau], \qquad (14)$$

$$\varphi = \frac{Ml}{\lambda a^4 G}, \qquad (15)$$

где $\alpha = 0{,}208$ – коэффициент;

$[\tau]$ – допустимая величина напряжения сдвига;

l – расстояние от основания вывода до места приложения усилия накрутки;

$\lambda = 0{,}14$ – коэффициент;

G – модуль упругости при сдвиге.

Крутящий момент

$$M_{\text{дв}} = P_{\text{дв}}R = RP\sin\beta\cos\gamma. \qquad (16)$$

Из формулы (16) и рис. 7 следует, что в связи с изменением радиуса R и угла β крутящий момент при повороте накручивающего валика относительно стороны вывода на угол от $\theta = \pi/2$ до $\theta = 0$ пульсирующе изменяется, хотя сила накрутки остается постоянной.

С учетом этих данных мощность электродвигателя, кВт,

$$N = \frac{M_{\text{дв}}\text{v}}{102\cdot 60}, \qquad (17)$$

где $\text{v} = 2\pi R n_{\text{н}}/1000$ – скорость накрутки, м/мин;

$n_{\text{н}}$ – частота вращения накручивающего валика (от 14 до 300 об/мин).

Очевидно, что при расчете мощности привода накручивающего устройства нужно учитывать эти особенности процесса.

Угол φ определяют в тех случаях, когда при небольшом расстоянии между накрученными концами проводника возможно его натяжение при разгрузке вывода от крутящего момента. Такое натяжение обычно недопустимо, поэтому необходимо предусматривать запас провода.

Из формулы (14) с учетом (16) получим минимальную величину стороны квадратного поперечного сечения вывода:

$$a = \sqrt[3]{\frac{M_{\text{дв}}}{\alpha[\tau]}}. \qquad (18)$$

Таким образом, получены основные соотношения, позволяющие при проектировании процессов и инструментов для электромонтажа способом накрутки найти главные параметры: осевые усилия натяжения проводника и прижима витков, силу, определяющую мощность привода электродвигателя, и параметры поперечного сечения вывода. Для этой цели в условиях часто меняющихся объектов производства может быть представлена автоматизированная система расчета всех параметров процесса накрутки.

УДК 621.865

Ю.З. Житников, *д-р техн. наук, профессор (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева),*
Б.Ю. Житников, *д-р техн. наук (ВЮИ, г. Владимир),*
А.А. Клычев, *инженер-конструктор (ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева", г. Ковров)*
E-mail: kgta_tms@mail.ru

Определение погрешностей относительного положения сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей при роботизированной сборке

На основе матричного метода определены погрешности положения в пространстве сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей при роботизированной сборке и определены пути их уменьшения.

On the basis of a matrix method errors of position of interfaced surfaces of connected details are defined, in space at the robotised assemblage and ways of their reduction are defined.

Ключевые слова: роботизированная сборка, робот-манипулятор, матричный метод, погрешность положения.

Key words: the robotised assemblage, the robot-manipulator, matrix method, position error.

Истинное положение осей соединяемых узлов и деталей в пространстве при роботизированной сборке можно определить на основе матричного метода.

Пусть в автоматизированном комплексе (рис. 1) цилиндрическая деталь *8* устанавливается в отверстие узла *11* роботом-манипулятором. В сопряжении соединяемых деталей имеет место посадка с гарантированным зазором.

Деталь *8* роботом-манипулятором, состоящим из направляющей *1* вращательного движения, стойки *2*, направляющей *3* поступательного движения, стойки *4*, направляющей *5* поступательного движения, горизонтально расположенной руки *6*, схвата *7*, который может поворачиваться вокруг оси руки на 90° для установки детали в сопрягаемое отверстие узла *11*, которое на остальных позициях поворотного стола *12* условно не показано, подается на сборочную позицию *11*. Поворотный стол поворачивается вокруг оси *13*, установленной в направляющей *14* вращательного движения. Детали *8* питателем магазинного типа *9* выдаются поштучно.

В исходном положении рука *6* робота-манипулятора расположена напротив питателя *9*. Автоматизированный комплекс запускается в работу. Выдвигается рука *6*, схват *7* захватывает деталь *8*. Рука возвращается в исходное положение. Робот-манипулятор поворачивается и устанавливается напротив позиции стола, на котором расположен собираемый узел *11*. Схват *7* поворачивается на угол 90°, устанавливая деталь *8* вертикально в положение *10*. Рука *6* выдвигается и устанавливается напротив узла *11* по оси отверстия. Стойка *4* опускается вниз и деталь должна войти в отверстие узла *11*.

Это может произойти только при выполнении условий собираемости [1].

Определим относительные смещения сопрягаемых поверхностей узла и детали, а также пути обеспечения надежной сборки.

Матричный метод предусматривает выбор абсолютной системой отсчета *XOYZ*, каждому элементу робота-манипулятора назначаются относительные системы отсчета $X_1Y_1Z_1$, $X_2Y_2Z_2$, ..., $X_6Y_6Z_6$, а элементам подающего устройства – $X_1'Y_1'Z_1'$, $X_2'Y_2'Z_2'$, …, $X_5'Y_5'Z_5'$.

При матричном методе задача нахождения положения объекта, его оси или сопрягаемой поверхности в пространстве сводится к определению их радиус-векторов путем приведе-

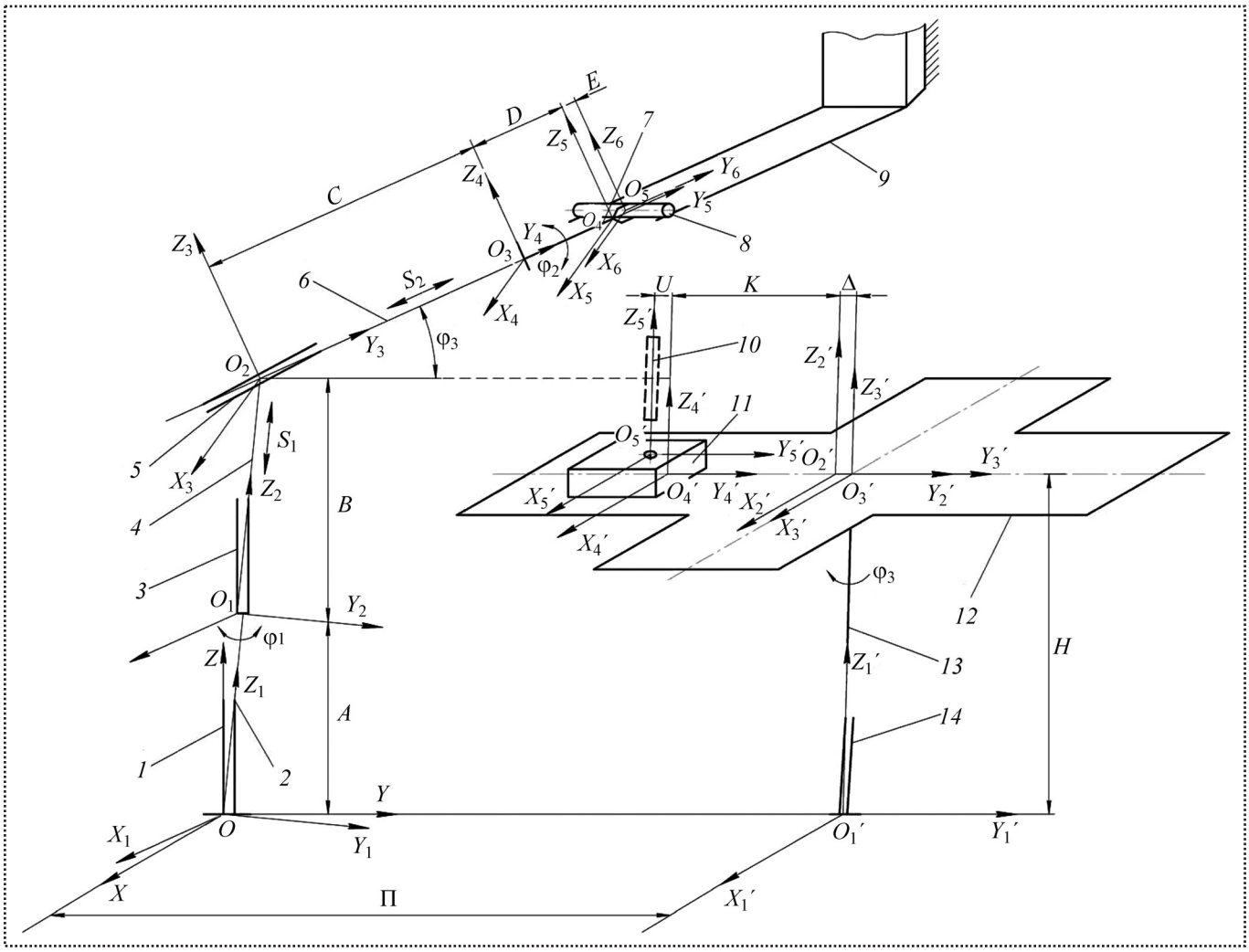

Рис. 1. Автоматизированный комплекс

ния относительных систем отсчета каждого элемента робота-манипулятора к абсолютной системе отсчета [2].

Запишем радиус-вектор положения сопрягаемой поверхности детали *8*:

$$\begin{aligned}\overline{R}_8 &= B_{\text{вр}}(\bar{i}_1;\Delta\alpha_1)B_{\text{вр}}(\bar{j}_1;\Delta\beta_1)B_{\text{вр}}(\bar{k}_1;\Delta\gamma_1)\times\\ &\times B_{\text{сд}}(\bar{k}_2;A-\Delta A)B_{\text{вр}}(\bar{i}_2;\Delta\alpha_2)B_{\text{вр}}(\bar{j}_2;\Delta\beta_2)\times\\ &\times B_{\text{вр}}(\bar{k}_2;\Delta\gamma_2)\ldots B_{\text{вр}}(\bar{i}_6;\Delta\alpha_6)B_{\text{вр}}(\bar{j}_6;\Delta\beta_6)\times\\ &\times B_{\text{вр}}(\bar{k}_6;\Delta\gamma_6)\bar{r},\end{aligned} \quad (1)$$

где $B_{\text{вр}}(\bar{i}_u;\Delta\alpha_u)$, $B_{\text{вр}}(\bar{j}_u;\Delta\beta_u)$, $B_{\text{вр}}(\bar{k}_u;\Delta\gamma_u)$ – четырехмерные матрицы поворота вокруг осей соответственно *X*, *Y*, и *Z*;

$A - \Delta A$ – размер элемента с допускаемым отклонением;

$B_{\text{сд}}$ – четырехмерные матрицы сдвига относительных систем отсчета вдоль осей;

$\bar{r}$ – радиус-вектор от относительной системы отсчета до сопрягаемой поверхности.

Произведение матриц $B_{\text{вр}}(\bar{i}_u;\Delta\alpha_u)B_{\text{вр}}(\bar{j}_u;\Delta\beta_u)$ учитывает неперпендикулярности осей Z_u к плоскости *XOY* абсолютной системы отсчета, поскольку для совмещения осей *Z* и Z_u необходимо повернуть оси относительной системы отсчета вокруг осей X_u и Y_u. Произведение матриц $B_{\text{вр}}(\bar{i}_u;\Delta\alpha_u)$ $B_{\text{вр}}(\bar{j}_u;\Delta\beta_u)$ $B_{\text{вр}}(\bar{k}_u;\Delta\gamma_u)$ позволяет совместить все оси относительных систем отсчета с абсолютной *XOYZ*.

Перемножение матриц выражения (1) дает координаты X_8, Y_8, Z_8 истинного положения сопрягаемой поверхности детали *8* в пространстве. Аналогичным образом можно записать радиус-вектор R_{11} сопрягаемой поверхности узла *11* в пространстве относительно абсолютной системы отсчета и после перемножения матриц получить координаты X_{11}, Y_{11}, Z_{11} истинного положения сопрягаемой поверхности отверстия узла *11* в пространстве. Разность координат позволит определить относительное смещение сопрягаемых поверхностей узла *11* и детали *8*, т.е. погрешности относительного смещения координат:

$$\Delta X = X_8 - X_{11};\ \Delta Y = Y_8 - Y_{11};\ \Delta Z = Z_8 - Z_{11}. \quad (2)$$

При отсутствии упоров, ограничивающих перемещение элементов робота-манипулятора и поворотного стола, а также при изготовлении элементов системы не ниже *7*-го или *8*-го квалитета точности и при допустимых отклонениях углов поворота ее элементов не менее ±30' погрешности относительного смещения координат положения сопрягаемых поверхностей в зависимости от линейных и угловых размеров, приведенных масс и моментов инерции элементов могут составлять 3–15 мм [2], что не позволяет осуществлять роботизированную сборку изделий.

Для обеспечения требуемой точности [1] относительного положения сопрягаемых поверхностей узла и детали необходимо устанавливать жесткие упоры, которые обеспечат минимальные погрешности линейных и угловых перемещений элементов робота-манипулятора. В рассматриваемом случае на вертикальной стойке *4* необходимо установить упор, фиксирующий ее верхнее положение, для обеспечения минимальной погрешности положения схвата по оси *Z* при захвате заготовки.

Для фиксированного положения выдвижения руки следует установить один упор. Для относительной доориентации схвата *7* и соединяемой детали *8* при поворотах руки *6* робота-манипулятора необходимо разместить упоры, жестко связанные с питателем *9* деталей и поворотным столом *12*. Кроме того, следует установить упор, фиксирующий положение стола при его поворотах.

Заметим, что под действием силы веса рука со схватом "провиснет", выбирая зазоры в подвижных элементах робота-манипулятора, что приведет к смещению по осям *X*, *Y*, *Z* конца соединяемой детали *8*. Но при опускании стойки *4* конец детали, взаимодействуя с поверхностью узла *11*, исключает "провисание", обеспечивая предварительную доориентацию осей.

Погрешности вертикального перемещения стойки *4* и выдвижения руки *6* будут определяться точностью настройки положения стойки и руки на заданный размер:

$$\Delta_н = \sqrt{(k_p \Delta_p)^2 + \left(\frac{k_и \Delta_и}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

где k_p, $k_и$ – коэффициенты, учитывающие отклонение законов распределения от нормального (k_p = 1,73; $k_и$ = 1);

Δ_p – погрешность метода измерения (настройки);

$\Delta_и$ – погрешность измерительного инструмента при контроле размера при настройке.

Найдем погрешности относительного смещения осей отверстия узла *11* и детали *8* при

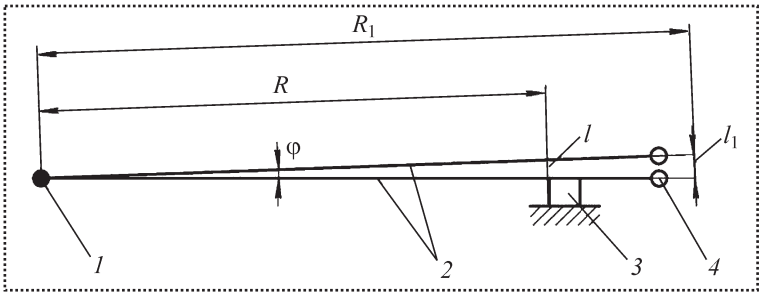

Рис. 2. Погрешность положения соединяемой детали при повороте до упора:
1 – ось вращения стойки;
2 – рука робота-манипулятора;
3 – упор;
4 – деталь в схвате

поворотах руки робота и стола. Учитывая, что на каждой позиции поворотного стола жестко установлен упор, фиксирующий поворот руки, необходимо настройку проводить для каждого упора, погрешности которых находятся из выражения (3). При малых углах поворота в первом приближении эти погрешности являются дугами l окружности (рис. 2). Тогда можно записать:

$$l = \Delta_{н} = R\varphi \quad , \tag{4}$$

где R – расстояние от оси стойки робота-манипулятора до упора.

Относительная погрешность осей отверстия на узле и оси детали

$$\Delta = l_1 = R_1\varphi \quad , \tag{5}$$

где R_1 – расстояние от оси стойки робота-манипулятора до оси соединяемой детали.

С учетом выражений (4) и (3)

$$\Delta = \frac{R_1}{R}\sqrt{(k_p\Delta_p)^2 + \left(\frac{k_и\Delta_и}{2}\right)^2}. \tag{6}$$

Для обеспечения надежной сборки необходимо, чтобы выполнялось условие, при котором относительная погрешность смещения осей не превышает суммы размеров фасок h на отверстии узла и h_1 – на соединяемой детали:

$$\Delta < h + h_1. \tag{7}$$

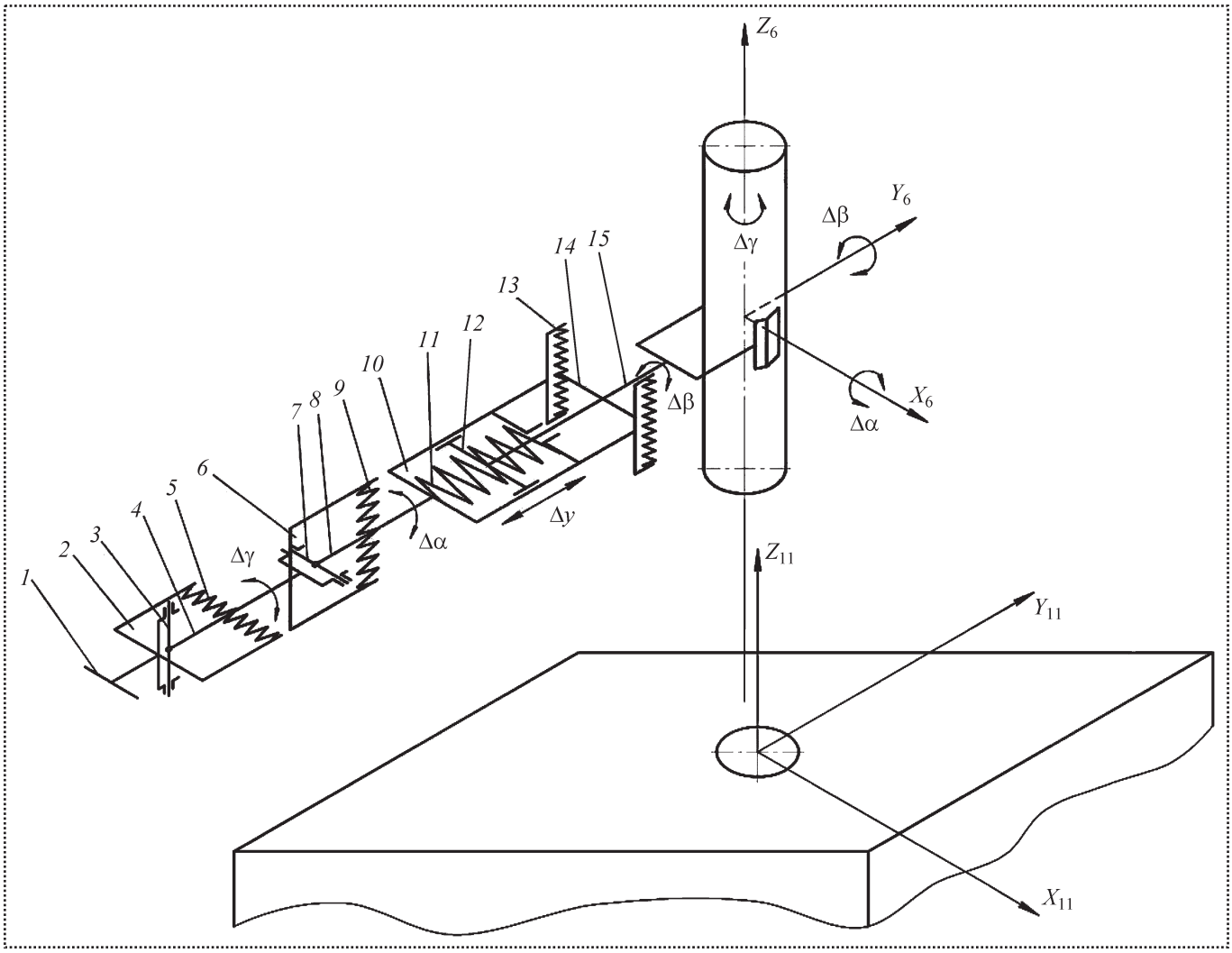

Рис. 3. Кинематическая схема упругой податливости схвата

Получено необходимое, но недостаточное условие надежной сборки, так как при выполнении условия (7) можно предварительно обеспечить только относительное совмещение осей соединяемых деталей, но не гарантировать выполнение условия их углового совмещения.

Для исключения перекосов осей Z_6 и Z_{11} деталь *8* за счет силового взаимодействия с узлом *10* при наличии податливости схвата должна одновременно повернуться вокруг осей X_6 и Y_6, а для исключения относительного смещения – обеспечить перемещение детали по осям X и Y в плоскости XOY.

Кинематическая схема упругоподатливого схвата представлена на рис. 3.

Фланцем *1* схват крепится к руке робота-манипулятора. Механизм *2* содержит ось *3*, к которой шарнирно крепится рычаг *4*, стабильность исходного положения которого обеспечивают пружины *5*. При силовом взаимодействии узла с деталью они перемещаются параллельно плоскости узла.

Механизм *6* включает в себя ось *7*, к которой шарнирно крепится рычаг *8*, стабильность исходного положения которого обеспечивают пружины *9*. При силовом взаимодействии узла с деталью они поворачиваются вокруг оси, параллельной X_6.

Механизм *10* содержит поршень *12*, исходное положение которого вдоль оси Y_6 обеспечивают пружины *11*. При силовом взаимодействии с фаской узла они дают детали возможность перемещения вдоль оси Y_6. Кроме того, механизм позволяет поворачиваться штоку *15* вокруг оси Y_6, а его исходное положение обеспечивают пружины *13*, связанные с рычагом *14*.

Совокупность механизмов *2* и поступательной части механизма *10* при силовом взаимодействии фасок детали и отверстия обеспечивает взаимную доориентацию осей отверстия узла и детали в плоскости XOY, а совокупность механизмов *6* и вращательной части механизма *10* – угловое совмещение осей Z_6 и Z_{11}. Надежная доориентация и сборка гарантируются при малых скоростях перемещения стойки по оси Z (не более 10–20 см/с).

Таким образом, предложен способ роботизированной сборки узлов и деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям с гарантированным зазором.

Библиографический список

1. **Гусев А.А.** Адаптивные устройства сборочных машин. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.

2. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, А.Г. Схиртладзе, А.Л. Симаков, Д.С. Воркуев; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Ковров: КГТА, 2008. 616 с.

УДК 621.9.02

А.Л. Плотников, *д-р техн. наук,* **А.С. Сергеев,** *аспирант,*
Е.Г. Крылов, *канд. техн. наук,* **М.Г. Кристаль, В.П. Заярный,** *д-ра техн. наук*
(Волгоградский государственный технический университет)
E-mail: crysmar@mail.ru

Автоматический контроль состояния сборного многолезвийного инструмента

Представлена методика контроля состояния сборного многолезвийного инструмента в автоматическом режиме на основе регистрации и аналого-цифрового преобразования сигнала термоЭДС естественной термопары "инструмент – деталь".

In the article an automated condition monitoring technique for assembled cutting tool on a base of measuring and analog-to-digital conversion thermoEMF signal of contact thermocouple tool-part is presented.

Ключевые слова: сборный инструмент, аналого-цифровое преобразование, термоЭДС.

Key words: assembled tool, analog-to-digital conversion, thermoEMF.

Современной тенденцией развития автоматизации машиностроительного производства является применение металлорежущих станков и станочных комплексов с числовым программным управлением. Основной фактор среди определяющих надежность обработки на фрезерных станках с ЧПУ – стабильная работа сборного многолезвийного твердосплавного инструмента в течение заданного периода времени, что, в свою очередь, требует расчета допустимой скорости фрезерования. Существующие методы ее определения ориентированы на то, что весь комплект (набор) режущих пластин обладает одинаковыми режущими способностями и расчетная скорость резания является рациональной для всего набора, обеспечивая тем самым расчетное время его безотказной работы. В то же время практика эксплуатации фрезерных станков с ЧПУ, оснащенных сборными торцовыми фрезами, показала, что до 50 % всех отказов в работе оборудования связано с преждевременным выходом из строя режущего инструмента [1].

В большинстве случаев все элементы процесса резания (скорость и сила резания, подача) на автоматизированном станочном оборудовании рассчитывают при помощи математических моделей или таблиц с использованием поправочных коэффициентов. При этом в зависимостях для определения допустимой скорости фрезерования кроме технологических параметров (подачи, стойкости и диаметра фрезы, глубины и ширины фрезерования) присутствуют как скоростной коэффициент C_v, учитывающий условия обработки, так и поправочные коэффициенты на марку инструментального $K_и$ и обрабатываемого $K_м$ материалов, усредненные из широких интервалов разброса физико-механических свойств материалов. Такое усреднение коэффициентов приводит к ошибкам при расчете допустимой скорости фрезерования для конкретных пар "сталь – твердый сплав".

Повысить надежность процесса фрезерования можно путем получения оперативной информации о фазовом составе режущего инструмента (его режущих свойствах) и степени упрочнения обрабатываемого материала непосредственно из зоны резания. Для этого предложено информацию о теплофизических свойствах контактирующих пар, фактической геометрии инструмента и условиях резания получать перед началом обработки на строго фиксированном режиме пробного хода (скорость резания v = 100 м/мин, подача на зуб

S_z = 0,1 мм/зуб, глубина резания t = 1 мм), в процессе которого измеряют возникающую термоЭДС естественной термопары "инструмент – деталь" и устанавливают связь между ее величиной и скоростным коэффициентом C_v.

Для выявления такой связи обработаны результаты стойкостных испытаний одним зубом экспериментальной фрезы различных пар "сталь – твердый сплав", у которых перед испытаниями измеряли термоЭДС пробного хода. Износ фаски по задней грани доводили до 0,8 мм и фиксировали суммарную стойкость инструмента с начала испытаний на различных скорости и глубине резания и подаче.

Скоростной коэффициент вычисляли по формуле

$$C_v = \frac{vT^m t^x S_z^y z^n k^n B^z}{D^q} E, \qquad (1)$$

где T – действительная стойкость инструмента из опыта, мин;

k – количество зубьев фрезы;

B, D – ширина фрезерования и диаметр фрезы, мм;

m, x, y, n, z, q – показатели степени при соответствующих параметрах;

E – термоЭДС пробного хода для каждой контактной пары, мВ.

Особенность расчета коэффициента C_v заключается в том, что в (1) не учитывают поправки на геометрию режущей кромки, прочностные свойства сталей и режущие свойства твердого сплава, а учитывают величину термоЭДС пробного хода (интегральную характеристику пары "сталь – твердый сплав").

Результаты испытаний показали, что для любых сочетаний исследуемых контактных пар

$$C_v = A - KE, \qquad (2)$$

где A = 378; K = 16,2 – постоянные коэффициенты, определенные по данным стойкостных испытаний.

Коэффициент C_v в данном случае представляет собой обобщенную энергетическую величину, характеризующую сочетание свойств пары "инструмент – деталь", которая определяет время работы сборного многолезвийного инструмента в заданных условиях резания. Использование уравнения (2) позволяет оперативно учитывать возможные изменения физико-механических и теплофизических свойств контактной пары через значение термоЭДС пробного хода.

Анализ процесса генерирования термоЭДС естественной термопары "инструмент – деталь" позволяет заключить, что данный параметр можно использовать для оценки как физико-механических свойств (обрабатываемости) сталей, так и режущих (износостойкости) твердых сплавов. Сигнал термоЭДС позволяет оценивать свойства каждой контактирующей пары. Его можно измерить, запомнить, преобразовать, использовать для сравнения и вычисления с помощью аппаратных средств системы ЧПУ. При этом отпадает необходимость проведения предварительных механических испытаний сталей для определения поправок на прочностные свойства обрабатываемого материала. Данное обстоятельство позволяет повысить точность автоматизированного назначения режимов резания.

Сигналы термоЭДС при прерывистом резании для получения информации о количестве режущих кромок инструмента, характере их расположения, биении, наличии полного контакта зубьев с металлом регистрируются с помощью цифрового осциллографа с высокой частотой дискретизации $f \geq$ 2...10 кГц [2]. В режиме пробного хода в течение 25...30 оборотов инструмента после начала обработки заготовки сигнал термоЭДС, снимаемый с токосъемника скользящего типа, поступает через RC-фильтр на вход цифрового осциллографа.

После аналого-цифрового преобразования полученный сигнал в двоичном коде передают через последовательный порт в персональный компьютер. Аналого-цифровое преобразование сигнала термоЭДС при фрезеровании позволяет зафиксировать быстротечные контактные процессы прерывистого резания, "растягивать" их во времени, изучать динамику процесса резания. Получено визуальное представление сигнала термоЭДС в виде осциллограмм.

На рис. 1 приведена осциллограмма термоЭДС при симметричном торцовом фрезеровании одним зубом фрезы заготовки из стали 45 пластиной из твердого сплава Т15К6. Сигнал термоЭДС весьма чувствителен к изменению химического состава контактной пары "сталь – твердый сплав".

На рис. 2 представлен процесс генерирования термоЭДС при фрезеровании одним зубом фрезы искусственно созданного "биметалла" – пластин из стали У7 и стали 45, зажатых в станочных тисках. Обработка начинается со стали У7, затем фреза входит в сталь 45. Хорошо видна различная интенсивность нарастания термоЭДС при обработке стали У7 и стали 45 из-за их различной теплопроводности. Различаются и величины термоЭДС, что свидетельствует о различных химическом составе сталей и работе выхода из них электронов, определяющей контактную составляющую сигнала термоЭДС и ее информативность.

Использование термоэлектрических явлений, сопутствующих процессу фрезерования, дает возможность предварительного диагностирования сборных фрез. При быстродействующем аналого-цифровом преобразовании можно зафиксировать значения сигнала термоЭДС каждой режущей кромки в виде осциллограммы для визуального представления на дисплее панели управления системы ЧПУ и использовать для оценки состояния комплекта инструмента.

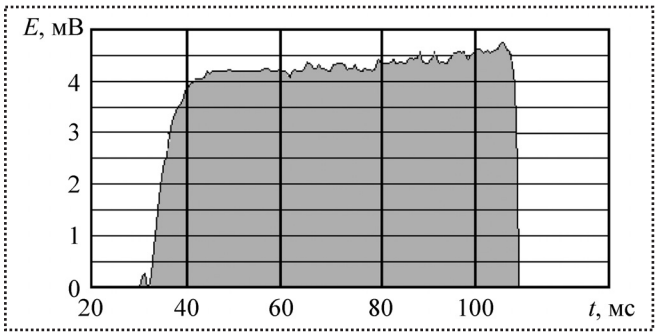

Рис. 1. Осциллограмма сигнала термоЭДС при обработке заготовки из стали 45 одним зубом фрезы из твердого сплава Т15К6:
v = 100 м/мин; S_z = 0,05 мм/зуб; t = 1 мм; D = 125 мм; B = 90 мм

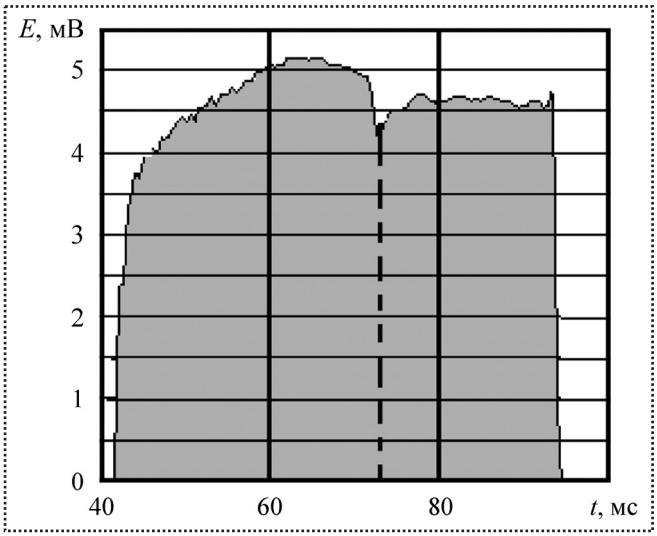

Рис. 2. Осциллограмма сигнала термоЭДС при обработке пары сталь У7 – сталь 45 одним зубом фрезы из твердого сплава Т15К6:
v = 100 м/мин; S_z = 0,05 мм/зуб; t = 1 мм; D = 125 мм; B_1 = 32 мм (сталь У7); B_2 = 42 мм (сталь 45)

В лабораторных условиях осциллограммы сигнала термоЭДС получены с помощью цифрового осциллографа с частотой дискретизации f = 10 кГц. Для определения положения первого зуба фрезы применен датчик оборотной метки, который представлял собой геркон, закрепленный на приспособлении в непосредственной близости от фрезы. На фрезе размещался магнит, который при приближении замыкал геркон. Таким образом, во время съема величины термоЭДС в течение нескольких миллисекунд генерировался сигнал о нахождении фрезы в нулевом угловом положении, который затем передавался на второй канал цифрового осциллографа и смешивался с основным сигналом. Смешивание сигналов организовано так, что на разных осциллограммах с разными наборами пластин геометрическое положение оборотной метки было постоянным.

На рис. 3 представлена осциллограмма сигнала термоЭДС за один оборот фрезы при полном симметричном фрезеровании стали 45 пластинами из твердого сплава Т15К6. При проведении экспериментов фреза была оснащена пластинами из различных партий поставки с E = 8...11 мВ.

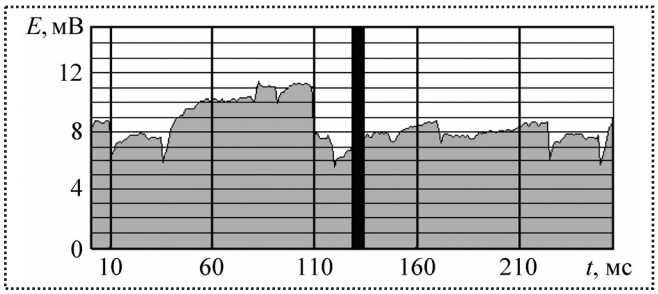

Рис. 3. Осциллограмма сигнала термоЭДС пары сталь 45 – Т15К6 за один оборот фрезы при полной ширине фрезерования:
v = 100 м/мин; S_z = 0,1 мм/зуб; t = 0,5 мм; D = 125 мм; B = 100 мм

При работе фрезерных станков с ЧПУ, оснащенных сборным многолезвийным инструментом, использование эффекта появления термоЭДС предоставляет возможность получения оперативной информации о его состоянии непосредственно на рабочем месте. Это позволяет станочнику анализировать по осциллограмме (карте состояния) процессы врезания фрезы в заготовку, учитывать изменение термоЭДС при смене твердосплавных пластин, оценивать степень их нагружения.

Для реализации этой возможности необходимо создать условия стабильной регистрации сигнала термоЭДС и его быстродействующего аналого-цифрового преобразования с частотой дискретизации не менее 1 кГц. На практике это возможно с помощью отдельного блока обработки сигнала, согласованного с УЧПУ фрезерного станка. В лабораторных условиях в качестве блока обработки сигнала использовали цифровой осциллограф Velleman мод. PCS-500. В производственных условиях это может быть модуль, непосредственно подключенный к системе ЧПУ, имеющий в своем составе аналого-цифровой преобразователь и программируемый контроллер. Современные УЧПУ как отечественного, так и зарубежного производства имеют аналоговые входы, что позволяет обеспечить ввод сигнала термоЭДС в современные УЧПУ без дополнительных устройств сопряжения.

На основе измерения термоЭДС пробного хода предложен способ автоматизированного определения допустимой скорости фрезерования [3, 4], в основу которого положена математическая модель

$$v = \frac{(378 - 16{,}2E)D^q}{T^m t^x S_z^y B^z},$$

которая позволяет решить как прямую задачу – расчет скорости фрезерования, так и обратную – прогнозирование стойкости комплекта сборного многолезвийного твердосплавного инструмента.

Экспериментальную проверку разработанного способа проводили при симметричном фрезеровании заготовок из стали 45 сборными торцовыми фрезами, оснащенными твердосплавными пластинами марок Т5К10 и Т14К8. Испытания показали, что максимальное отклонение заданной стойкости инструмента от действительной не превышает 10 % и может быть принято как допустимое при обработке на фрезерных станках с ЧПУ.

Для практического использования предлагаемого способа расчета допустимой скорости фрезерования в автоматизированном производстве разработано программное обеспечение, которое можно применить при разработке технологических процессов обработки и написании управляющих программ для фрезерных станков с ЧПУ [5, 6].

Библиографический список

1. **Плотников А.Л., Ханов Г.В., Крылов Е.Г.** Обеспечение надежности работы сборного многолезвийного твердосплавного инструмента на автоматизированном станочном оборудовании // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 3. С. 40–44.

2. **Патент** РФ № 2203778. Способ контроля состояния режущих кромок сборных многолезвийных инструментов / А.Л. Плотников, А.А. Василенко // Б.И. № 13, 2003.

3. **Патент** РФ № 2312750. Способ контроля состояния режущих кромок сборных многолезвийных инструментов / А.Л. Плотников, Е.Г. Крылов // Б.И. № 35, 2007.

4. **Крылов Е.Г., Плотников А.Л., Берсенев П.В.** Автоматизированный контроль качества сборки твердосплавных торцовых фрез // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010, № 7. С. 32–37.

5. **Расчет** режима обработки для симметричного торцового фрезерования стальных заготовок сборной твердосплавной фрезой: свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2008613649 РФ / А.Л. Плотников, Е.М. Фролов, Е.Г. Крылов. 2008.

6. **Расчет** режима обработки для симметричного торцового фрезерования стальных заготовок сборной твердосплавной фрезой с учетом количества и позиций режущих элементов с наименьшими режущими свойствами: свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2009612342 РФ / А.Л. Плотников, Е. М. Фролов, Е.Г. Крылов. 2009.

УДК 621.7-112.81.004.12:621.7.01

Т.Ю. Пашеева, *аспирант (Мурманский государственный технический университет)*
E-mail: pasheeva-tatjana@rambler.ru

Точность и стабильность технологических процессов – путь эффективного воздействия на качество изготовления сборочно-сварочных металлоконструкций

Отражены пути достижения точности технологического процесса, вопросы контроля и предупреждения дефектов, а также методика анализа данных эксперимента по точности изготовления заготовок.

Ways of achievement of accuracy of technological process, questions of the control and the prevention of defects, and also a technique of the analysis of the data of experiment on accuracy of manufacturing of preparations are reflected.

Ключевые слова: точность, качество, заготовка, металлоконструкция, производство.

Keywords: accuracy, quality, blank-making, metal construction, manufacture.

Существенный резерв сокращения сроков изготовления сварных изделий и повышения производительности труда заключается в соблюдении технологии производства в отношении точности изготовления металлических конструкций.

Эффективность изготовления сварных металлоконструкций находится в прямой зависимости от обеспечения собираемости изделия. Сборка металлоконструкций без дополнительной подгонки и исправления должна обеспечиваться изготовлением сборочных элементов с заданной точностью. Существует прямая зависимость качества сварки и прочности металлоконструкции от качества и точности резки заготовки. Неровные и неточные резы существенно затрудняют процесс сборки и впоследствии при сварке деталей могут привести к возникновению существенных внутренних напряжений в металлоконструкции, что негативно скажется на ее работоспособности или приведет к деформациям.

Залогом изготовления качественной сварной металлоконструкции является точное изготовление исходной заготовки для дальнейшей сборки и сварки [1]. Точность технологического процесса – свойство, обусловливающее близость действительных и номинальных значений параметров производимой продукции.

Управление технологическими процессами

Точность машиностроительной продукции – понятие сложное, включающее три ее разновидности – конструкторскую, технологическую и эксплуатационную.

Технологическую точность рассматривают в производстве изделий. Применяют три вида воздействия на технологическую точность – устранение, компенсацию и учет. Наиболее действенны меры устранения, которые сводятся к устранению причин образования погрешностей.

Основной целью управления технологическим процессом является обеспечение информации о его ходе и оказание помощи в выпуске качественных изделий. Следует заметить, что даже при самом стабильном и надежном технологическом процессе необходимо контролировать изделия (детали, заготовки) с целью предупреждения появления дефектных изделий.

Для управления технологическим процессом необходимо установить входные управляющие воздействия и выходные параметры, зависимость между которыми определена пу-

тем их измерения. Управление технологическим процессом предполагает определение:

– возможностей процесса производства;

– степени соответствия изделия техническим условиям;

– причин отклонений от нормы;

– причин несоответствия техническим условиям;

– управляющих воздействий, необходимых для устранения отклонений, вызывающих несоответствие продукции техническим условиям.

К управляемым переменным относятся:

• параметры технологического процесса;

• состояние средств технологического оснащения;

• технико-экономические показатели производства изделий, формируемые в ходе технологического процесса (производительность, себестоимость, точность, выход годной продукции и др.).

Среди управляемых переменных параметров следует выделить точность технологических процессов, призванную обеспечить близость действительных значений параметров к нормируемым, и стабильность – постоянство распределения вероятностей параметров технологического процесса к нормируемым значениям. Оценку точности и стабильности технологических процессов проводят на стадии технологической подготовки.

Для того чтобы обеспечить необходимые состояние и точность технологического оборудования и оснастки, гарантирующие выполнение требований нормативно-технических документов при изготовлении продукции, необходимо определить сроки, методы и средства проверки состояния технологического оборудования и оснастки, условия проведения их технологического обслуживания и ремонта, а также порядок их модернизации и обслуживания.

Оценка показателей точности процесса и закономерностей его протекания во времени составляет предмет статистического анализа точности технологического процесса (или его составных частей).

Достижение точности технологического процесса с помощью анализа данных эксперимента по точности изготовления заготовок

При проектировании технологических процессов необходимо располагать всеми данными, характеризующими технологическое оборудование. Его выбор прежде всего определяется возможностью обеспечения выполнения технических требований, предъявляемых к обрабатываемой детали в отношении точности ее размеров, формы и чистоты поверхностей. Если эти требования можно выполнить на различных станках, то при выборе руководствуются следующим:

– соответствие основных размеров оборудования (станка, машины и т.д.) габаритным размерам обрабатываемой детали (нескольких одновременно обрабатываемых деталей);

– соответствие производительности оборудования количеству деталей, подлежащих обработке;

– наиболее полное использование станка по мощности и времени;

– наименьшие затраты времени на обработку;

– наименьшая себестоимость обработки.

В зависимости от поставленной задачи различают технологическую и операционную точность процесса обработки; технологическую точность станков и т.д.

При проектировании технологических процессов необходимо знать ожидаемые погрешности обработки на отдельных операциях. Эти данные определим расчетно-аналитическим методом на основе анализа первичных элементарных погрешностей обработки. Цели расчета точности обработки:

– оценить величину возможного рассеяния заданного параметра (вычислить суммарную погрешность обработки);

– разработать мероприятия, снижающие влияние доминирующих погрешностей на точность обработки;

– регламентировать продолжительность обработки деталей до принудительной подрегулировки или смены режущего инструмента, наиболее изнашивающихся деталей приспособления и т.п.

При исследовании и анализе технологических процессов приходится учитывать случайные факторы и воздействия, отраженные случайными величинами и функциями. Значения случайных величин в рамках рассматриваемой задачи могут быть неодинаковыми, и момент их появления заранее предсказать невозможно.

Зададим случайные величины X, Y, W, v. Их значения, полученные в результате опыта, обозначим соответственно x, y, w, v. Номера опытов укажем индексом, например x_1, x_2, x_3 и т.п. Характеристикой случайной величины является закон ее распределения. Интегральный закон распределения $F(x)$, или функция распределения, показывает вероятность P того, что данная случайная величина X имеет значение меньше заданного x:

$$P(X < x) = F(x).$$

Вероятность события $X < x$ равна отношению числа случаев M, благоприятствующих событию, к общему числу N возможных случаев:

$$P(X < x) = \frac{M}{N}.$$

Вместо интегрального воспользуемся дифференциальным законом распределения $f(x)$, характеризующим плотность распределения вероятности:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

Система (совокупность) случайных величин характеризуется многомерной функцией распределения. Так, для системы случайных величин X, Y, Z

$$F(x,\ y,\ z) = P\{X < x;\ Y < y;\ Z < z\}.$$

Случайной называют такую функцию $X(t)$, значение которой при любом t является случайной величиной. Аргументом t является время – переменная, но не случайная величина. При анализе технологических процессов или отдельных операций t может принимать любые значения в заданном интервале. В этом случае функцию $X(t)$ называют случайным процессом. К случайным относятся процессы изменения размеров деталей (заготовки) при изготовлении (в связи с изнашиванием инструмента и температурными деформациями технологической системы).

При проведении n независимых опытов, в каждом из которых может быть получена реализация случайных величин $X(t)$, обозначаем реализацию опытов с указанием их номеров в индексе: $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$. Случайная функция может быть задана многомерными законами распределения для любых значений t_1, t_2, t_3, ..., t_n из области изменения аргумента t. Следовательно, случайные величины и функции задаются вероятностными характеристиками. Поэтому при анализе результатов экспериментов, теоретических расчетах точности технологических процессов задачу сводят к отысканию выходных вероятностных характеристик по известным, также вероятностным, характеристикам входных случайных величин и функций.

Рассмотрим законы распределения случайных величин.

Параметры точности изготовления деталей, шероховатость обработанной поверхности и другие признаки деталей зависят от большого количества исходных элементарных факторов. Если анализируемый признак является результатом суммарного действия ряда элементарных факторов, причем каждый из них незначительно меняется во времени, мало связан с большинством остальных и влияние каждого фактора на результат намного перекрывается суммарным влиянием остальных факторов, то закон распределения таких величин близок к нормальному.

Распределение погрешностей размеров (линейных и угловых) заготовок и деталей, по-

грешностей настройки, расположения заготовок в приспособлениях, значений шероховатости, твердости поверхности и других физико-механических свойств детали может подчиняться нормальному закону.

В результате эксперимента получают некоторое количество значений анализируемого параметра: x_1, x_2, x_3, ..., x_n. Задача состоит в том, чтобы на основе этого ограниченного по объему экспериментального материала получить надежную оценку случайной величины X. Так как число опытов n конечно, то точно определить вероятностные характеристики случайной величины X в общем случае невозможно, ибо никакая конечная совокупность значений случайной величины не содержит полной информации о ее вероятностных свойствах. Могут быть получены только приближенные значения оценки вероятностных характеристик случайной величины.

Исследуем точность заготовительной операции. Необходимо выявить закон распределения случайной величины (исследуемого параметра), оценить среднее значение параметра в партии, рассеяние его значений, долю деталей, признак которых лежит в определенных пределах, и т.п. Для этого отбираем ряд заготовок путем единовременной (50–200 деталей) или текущих (по 5–25 деталей в течение исследуемого периода) выборок. Текущие выборки позволяют изучить закономерность изменения размеров под действием систематических погрешностей (изнашивания режущего инструмента, температурных деформаций системы и т.п.) [2].

Чтобы получить однородные данные, необходимо соблюдать одинаковые условия изготовления и контроля деталей. Так, контроль необходимо проводить в определенных сечениях одним и тем же инструментом. Результаты измерений указываем в абсолютной величине или записываем в виде отклонения от номинального значения. Приближенно принимаем закон распределения и вычисляем эмпирические характеристики распределения.

Исследование точности и стабильности технологических процессов с целью улучшения качества

Улучшение качества возможно при совершенствовании процессов. Управление качеством представляет собой методы и деятельность оперативного характера, используемые для выполнения требований к качеству. К ним относятся:

– управление процессами, выявление отклонений от установленных требований;

– принятие решений по дальнейшему использованию продукции, имеющей отклонения или дефекты;

– недопущение появления повторных отклонений или дефектов благодаря своевременной разработке и реализации корректирующих воздействий;

– выявление несоответствий в производстве или системе качества и их устранение вместе с причинами.

Вся работа, выполняемая по определенной технологии, представляет совокупность взаимосвязанных процессов. Соответственно общее руководство качеством осуществляется через управление всей совокупностью процессов.

Системный подход предполагает наличие следующих этапов:

• разработка технических условий технологического процесса;

• анализ схемы технологического процесса;

• установление каналов передачи данных, особенно обратной связи;

• разработка детальной документации на все операции процесса, информационное обеспечение и вспомогательные виды деятельности.

Непосредственное достижение запланированных показателей качества происходит на этапе производства. Процесс производства представляет собой совокупность взаимосвязанных ресурсов и деятельности, которые преобразуют вход процессов в соответствующий выход. К ресурсам относятся кадры, оборудование, методы изготовления и стандарты. Вход

процесса – поставляемые материалы и необходимая информация. Все поставщики материалов и информации на вход процесса считаются внешними поставщиками, а производство для них – потребитель. Выход процесса – готовый продукт.

При управлении качеством необходимо влияние на процесс, а не на его результат. Главное требование – предупреждение несоответствий, а не контроль конечного результата. Этого можно добиться с помощью корректирования хода выполнения операции на основе информации по обратной связи. При этом необходимо обеспечить пристальное внимание к процессу в результате анализа статистических данных о его протекании.

Цель управления – обеспечить стабильность (устойчивость) процесса с непрерывным уменьшением его вариаций. Все вариации процесса – следствие проявления специальных и общих причин. Специальные причины связаны с нарушением нормального хода процесса. Общих причин много, влияние каждой в отдельности невелико, но из-за их количества суммарное воздействие может стать весьма ощутимым. Необходимо устранить специальные причины вариаций и затем уменьшить вариации, обусловленные общими причинами. Устранение специальных причин – не совершенствование процесса, а только шаг к налаживанию статистического контроля.

Необходимо перенести внимание с отдельных проявлений несоответствий и дефектов продукции на вариации процесса – источник несоответствий, причины которых нужно найти и устранить. Система управления качеством воздействует на часть входов, чтобы на выходе процессы были устойчивы и их вариации уменьшались.

В ходе планирования качества создается процесс, способный удовлетворить поставленные цели при действующих условиях. В системе управления качеством основная задача – не фиксировать брак, а предупреждать его. Для повышения качества недостаточно применять прогрессивную технологию, необходимо постоянно совершенствовать систему контроля качества. Вместо приемочной операции по отбраковке негодных заготовок и деталей следует применять контроль по предупреждению брака на всех производственных стадиях формирования качества продукции.

Обеспечение качества продукции в процессе производства зависит от следующих факторов:

– организация и обеспечение ритмичности работы предприятия и его цехов;

– качество поступающих и комплектующих изделий;

– уровень метрологического обеспечения производства;

– управление технологическим процессом;

– контроль и испытания продукции.

Для снижения затрат по контролю качества необходимо использовать статистические методы контроля, которые включают в себя статистические регулирование технологических процессов и приемочный контроль. Статистическое регулирование основано на исследовании точности и стабильности технологических процессов и может быть использовано для установления связи между параметрами качества, причинами возникновения брака и необходимостью корректировки технологического процесса. Оно призвано корректировать значения параметров технологического процесса по результатам выборочного контроля параметров.

В статистическом методе анализа и оценки качества продукции значения показателей определяют с использованием правил математической статистики. Каждому процессу присуща собственная изменчивость качества, и нужно найти способы ее минимизации. Необходимо получить информацию о реальной работе процесса, оценить и проанализировать его характеристики, провести статистический анализ причин отклонения, исследовать, каким образом вариации различных контролируемых параметров воздействуют на признак качества.

Важнейшая задача – расслоение причин на общие и специальные, так как их устраняют по-разному. Это позволит предотвратить несо-

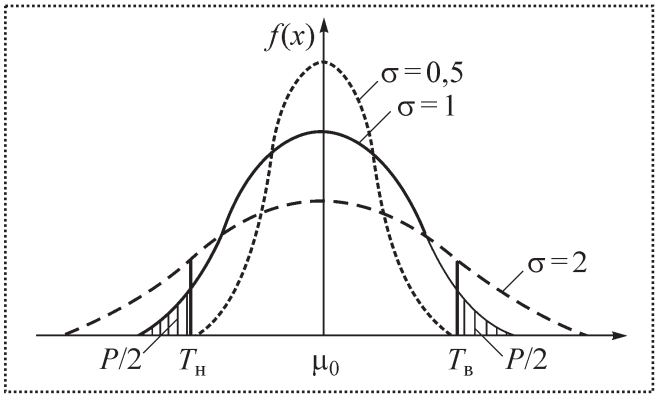

Рис. 1. Кривая плотности нормального распределения при различных значениях σ

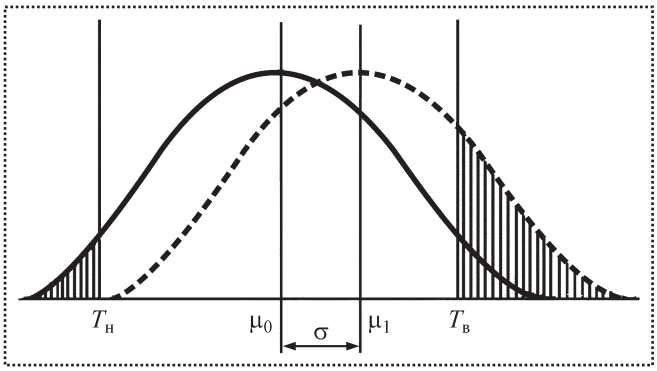

Рис. 2. Изменение доли дефектной продукции (заштрихованная область) при разладке процесса

ответствия и повысить производительность процесса с последующей оценкой эффективности проведенных действий.

Статистическое регулирование технологического процесса – это корректирование значений его параметров по результатам их выборочного контроля, осуществляемое для технологического обеспечения требуемого уровня качества продукции.

Долю дефектной продукции P определяют, допустив вероятность значения случайной величины χ за пределами поля допуска $T_н - T_в$:

$$P(T_н < \chi < T_в) = \Phi\left(\frac{T_в - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_н - \mu}{\sigma}\right),$$

где σ и μ – среднеквадратическое отклонение и математическое ожидание случайной величины χ;

$\Phi(x)$ – функция нормального распределения.

Из формулы следует, что с увеличением поля допуска возрастает доля годной продукции, а с повышением σ растет доля дефектной продукции (рис. 1). Чем больше отклонение μ_1 от μ_0 при неизменном σ, тем меньше доля годной продукции (рис. 2).

Точность и стабильность процесса оценивают на этапе предварительной оценки. Основная задача – подтвердить на основе полученных результатов статистическую стабильность процесса или привести его в данное состояние.

Величина σ показывает, как часто могут возникать дефекты. Чем она больше, тем менее вероятно, что возникнет дефект, тем выше надежность продукта, ниже потребность в испытаниях и контроле, меньше затраты и время производственного цикла, больше удовлетворенность потребителя [3].

Применение статистических методов позволит организовать управление качеством продукции и производством на основании фактических данных, используемых для наиболее эффективного поиска, анализа и принятия решений.

Библиографический список

1. **Шолохов М.А.** Точность заготовки – залог качества сварной металлоконструкции // Сварщик-профессионал. Национальная Ассоциация Контроля и Сварки. 2006, № 6. С. 14–15.

2. **Справочник** технолога-машиностроителя / под ред. А.Г. Касиловой, Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1973. С. 76–79.

3. **Управление** качеством. Сертификация / В.А. Васильев и др. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 413 с.

УДК 519.85

В.Н. Носков, *канд. техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярёва)*
E-mail: noskovne@mail.ru

Развитие функциональных возможностей систем управления моделированием технических объектов

Работа посвящена расширению функциональных возможностей систем управления моделированием сложных технических объектов. Рассмотрен пример использования СУМ СТС для автоматизации управления применением «Методики проектирования блоков инверторов» на базе их параметрического ряда.

Work is devoted to a question of expansion of functionalities of control systems of modelling of difficult technical objects. Reasonings are illustrated on an example of application of "СУМ СТС" for automation of management by application of "the Technique of designing of blocks of inverters" on the basis of their parametrical lines.

Ключевые слова: блок инверторов, критерий подобия, методика построения конструкции, параметрический ряд, система управления моделированием, техническое задание, управление потоком работ, CAD/CAE-системы.

Key words: the block of inverters, criterion of similarity,technique of construction of a design, a parametrical line, control system of modeling, the technical project, workflow, CAD/CAE-systems.

Во многих организациях, разрабатывающих и производящих технические системы, например системы электропривода, накоплен значительный опыт не только в построении их параметрического ряда, но и в формировании методики построения конструкции, регламентирующей действия от анализа технического задания до разработки конструкций новых модулей и проведения поверочных расчетов. Причем при разработке новых конструкций стремятся к максимальной их унификации.

Проектирование ведется на компьютерах с применением CAD-систем [1]. При этом возникает потребность в автоматизации управления применением самих методик построения конструкций, моделирования и выпуска конструкторской документации.

На примере конструкций силовых полупроводниковых преобразователей – блоков инверторов (БИ), применяемых при построении систем электропривода с электродвигателями переменного тока, автором предложено в качестве основы для автоматизации управления применением подобных методик использовать функционал систем управления моделированием сложных технических систем (СУМ СТС) [2], расширенный некоторыми дополнительными процедурами.

Инвертор представляет собой устройство, выполненное на полупроводниковых приборах, и служит для преобразования постоянного тока в переменный.

Схема соединений типовых функциональных БИ на основе модулей IGBT приведена на рис. 1.

Транзисторно-диодный модуль служит для выполнения коммутационных процессов в соответствии с сигналами, вырабатываемыми системой управления.

Потери мощности, выделяемой модулями в виде теплоты, должны быть рассеяны системой обеспечения теплового режима, состоящей из вентилятора, диффузора, радиатора и датчика температуры. Вентилятор обеспечивает более интенсивный отвод теплоты через радиатор в окружающую среду. Входной блок обеспечивает требуемое качество питания БИ по постоянному току, выходной блок, включающий блоки RC и диодов – электромагнитную совместимость БИ с нагрузкой и уменьшение волновых процессов в кабеле, соединяющем БИ с двига-

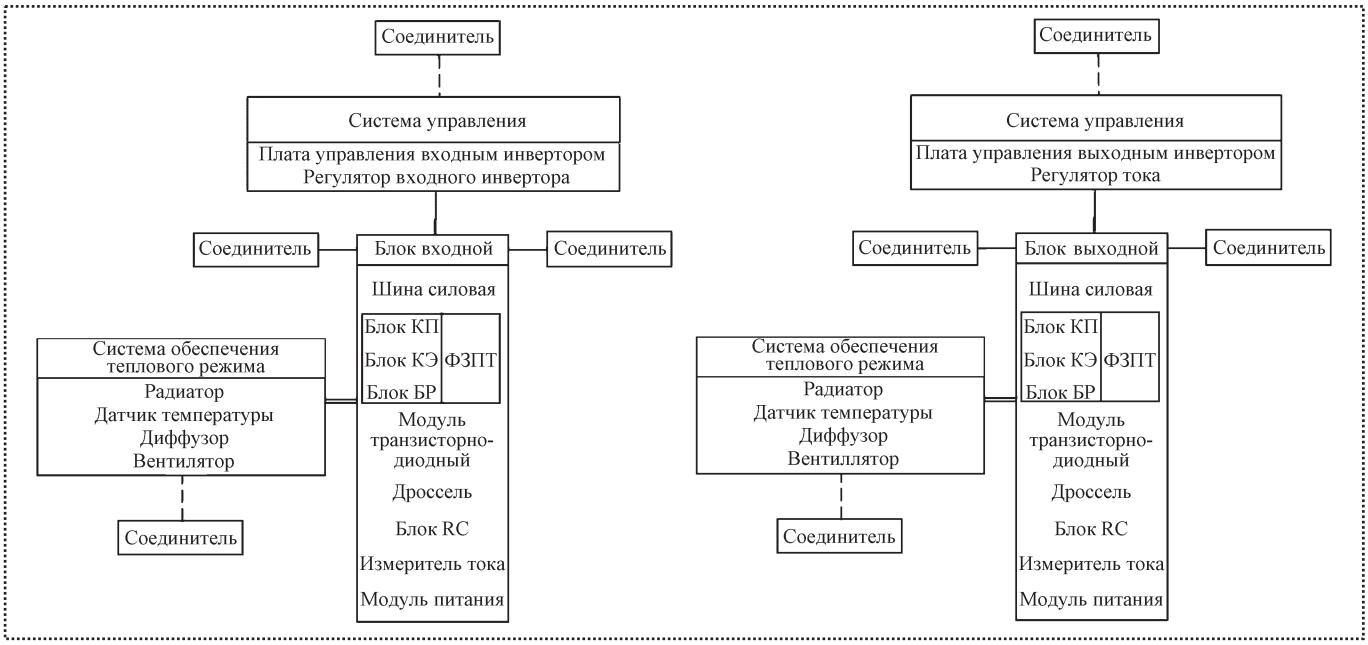

Рис. 1. Схема соединений типовых функциональных БИ на основе модулей IGBT:
блоки: КП – конденсаторов пленочных, КЭ – конденсаторов электролитических, БР – резисторов, RC – резисторно-конденсаторных цепей;
ФЗПТ – фильтр звена постоянного тока

телем. Дроссель ограничивает скорость нарастания тока фазы нагрузки (применяется для входного и выходного БИ). Входящие во входной и выходной блоки измерители напряжения и тока выдают в систему управления информацию об их величинах.

Пример конструктивного исполнения одного из вариантов БИ представлен на рис. 2.

Укрупненно методика предприятия–разработчика БИ регламентирует следующую последовательность действий:

– выбор типовой принципиальной электрической схемы;

– анализ возможности ее применения для выполнения требований технического задания (ТЗ);

– расчет параметров основных функциональных блоков и их составных частей;

– выбор компонентов электрической принципиальной схемы, обеспечивающих расчетные параметры;

– конструктивная реализация БИ;

– выпуск конструкторской документации.

Для предлагаемого варианта автоматизации управления применением методики проектирования изделия с использованием СУМ СТС нужно решить следующие задачи:

• создание базы по составу, характеристикам и типовым расчетам разработанных ранее на предприятии изделий [3];

• разработка процедуры автоматического анализа ТЗ на новые изделия;

• разработка процедуры автоматического поиска в базе данных СУМ СТС прототипа изделия;

• разработка процедуры автоматического генерирования заданий для WorkFlow СУМ СТС на доработку прототипа.

Переменные состояния технической системы, которые разделяют на входные воздействия, внешние факторы, внутренние параметры и выходные характеристики, можно оформить в СУМ СТС.

Рассмотрим пример возможного состава групповой характеристики "Внешние факторы". Для вновь проектируемого изделия значения характеристик на данном этапе еще не оп-

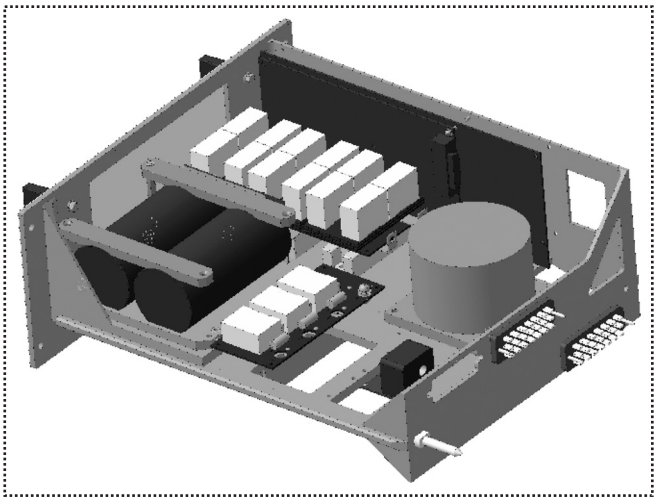

Рис. 2. Модель блока инвертора

ределены. Требуемые значения переменных состояния нового изделия заполняются в соответствующих групповых характеристиках СУМ СТС процедурой автоматического анализа ТЗ. Нахождение требуемых значений в тексте ТЗ проводится по ключевым словам названия соответствующих характеристик.

Реализация автоматического анализа ТЗ требует введения в справочник СУМ СТС новых типов документов: "Контекст технического объекта" и "Техническое задание", а реализация процедуры автоматического поиска прототипа – "Таблица расчета критерия подобия". Анализ ТЗ запускается соответствующей процедурой из контекстного меню "Технического задания".

Процедура автоматического разбора содержания ТЗ определяет тип документа (в данном случае ТЗ), объекта (блок инверторов), перечень разделов ТЗ (регламентирован соответствующим ГОСТ) и из соответствующего раздела выделяет перечень характеристик, их значений и размерность.

Расчетные значения переменных состояния определяют с применением интегрированных с СУМ СТС САЕ-систем. Например, по анализу механических характеристик печатного узла делают выводы о соответствии техническим условиям на электрорадиоизделия по механическим характеристикам. Этот анализ можно провести интегрированной с СУМ СТС САЕ-подсистемой АСОНИКА-ТМ [4]. Такая интеграция позволяет хранить в базе СУМ СТС, просматривать и редактировать проекты АСОНИКА-ТМ.

При взятии на редактирование происходит автоматическая выгрузка проекта из базы данных СУМ СТС и запуск АСОНИКА-ТМ. Внешний вид окна приложения с загруженным проектом приведен на рис. 3, один из результатов анализа – на рис. 4 (см. 2-ю с. обл.).

Аналогично для оценки показателей надежности узлов БИ можно применить интегрированную с СУМ СТС САЕ-подсистему АСОНИКА-В, для оценки влияния механических воздействий на механические конструкции – САЕ-подсистему АСОНИКА-М, для расчета электрических параметров – моделирующую систему PSpice.

Автоматический поиск прототипа запускается из контекстного меню нового изделия. Автоматический поиск прототипа нового изделия проводится по критерию подобия его новому ТЗ. Простейшим критерием подобия может быть выражение

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\mathrm{abs}(X_{i,T} - X_{i,\text{П}})}{X_{i,T}} + \sum_{j=1}^{m} \frac{\mathrm{abs}(Y_{j,T} - Y_{i,\text{П}})}{Y_{j,T}}}{n+m},$$

где $X_{i,T}$, $Y_{i,T}$ – i-е и j-е требуемые входное воздействие и выходная характеристика;

$X_{i,\text{П}}$, $Y_{i,\text{П}}$ – i-е и j-е входное воздействие и выходная характеристика прототипа;

n, m – количество входных воздействий и выходных характеристик;

abs – абсолютная величина выражения внутри скобок.

Расчет критерия подобия выполняется автоматически программой Exel в заполненном шаблоне "Таблица расчета критерия подобия".

При работе с процедурой поиска прототипа изделия при нажатии на кнопку "Рассчитать критерий подобия" происходит соответствующий расчет для отобранных изделий. Изделие с максимальным критерием подобия автома-

тически заносится в соответствующую таблицу. У пользователя есть возможность коррекции критерия нажатием на кнопку "Скорректировать критерий подобия". Если на основе собственного опыта пользователь хочет выбрать другое изделие, то он может осуществить это, нажав на нужное изделие во второй таблице, после чего нажатием кнопки "Принять" в СУМ СТС организуется связь между новым изделием и найденным прототипом.

Генерация потоков заданий на доработку прототипа для WorkFlow СУМ СТС проводится в зависимости от фактов совпадений (или несовпадений) значений входных воздействий и выходных характеристик прототипа и требуемого по ТЗ образца.

Потоки заданий формируются по заранее подготовленным шаблонам процессов доработки изделия по соответствующему параметру.

Генерация более детальных потоков заданий может проводиться с учетом структуры прототипа, наличия и взаимосвязи в структуре прототипа выделенных модулей, к которым как и ко всему изделию должны быть прикреплены соответствующие им групповые характеристики. Для прототипов, имеющих в своей структуре выделенные модули, генерация потоков заданий на доработку может иметь итерационный характер.

Более конкретные указания по доработке самих модулей могут быть сформированы на основании проведения для них анализа чувствительности, позволяющего оценить степень влияния каждого внутреннего параметра на выходные характеристики объекта и при генерации задания на доработку модуля сформировать конкретные рекомендации.

Реализации вышеописанной автоматизации управления применением методики проектирования на базе различных СУМ СТС могут различаться в зависимости:

– от соответствия интегрированных с СУМ СТС CAD/CAE-систем (или их версий) используемым предприятием–разработчиком изделия;

– от предусмотренных в функционале СУМ СТС средств разработки приложений.

Может, например, потребоваться расширить библиотеку интегрированных с СУМ СТС CAD/CAE-систем и API-функций, воспользоваться средствами встраивания внешнего приложения в интерфейс СУМ СТС или использовать его автономно.

Таким образом, на примере БИ показана возможность автоматизации управления применением методики проектирования изделия на базе СУМ СТС.

Библиографический список

1. **Создание** интегрированной системы автоматизированного проектирования и комплексного компьютерного моделирования высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры в рамках CALS-технологий / А.С. Шалумов и др. // EDA Express. 2005, № 11. С. 9–15.

2. **Реализация** системного подхода при моделировании радиоэлектронных средств / А.С. Шалумов, В.Н. Носков и др. // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. 2006, № 4. С. 25–37.

3. **Соловкин А.А.** Информационно-концептуальная модель данных автоматизированной системы управления моделированием. // Качество, инновации, образование. 2007, № 5. С. 69–76.

4. **Автоматизированная** система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Т. 1 / под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат, 2007. 368 с.

УДК 681.3

Д.И. Коклёнков, *аспирант ("КГТА им. В.А. Дегтярева", г. Ковров)*
E-mail: dmitri_k@inbox.ru

Организация системы сборки изделий на малом предприятии

Представлена эффективная методика, позволяющая быстро и точно рассчитывать время и финансовые затраты на сборку каждого изделия в условиях малого предприятия.

The effective technique of assemblage products at small enterprise is presented. She allows quickly and precisely to calculate time and financial expenses spent for assemblage of each product.

Ключевые слова: сборка изделий, время сборки, расчет затрат, система расчета.
Key words: assemblage of products, assemblage time, calculation of expenses, calculation system.

Сборка является одним из заключительных этапов изготовления изделия, в котором проявляются результаты работы, проделанной конструкторами и технологами. Качество изделия и трудоемкость сборки во многом зависят от того, как воплощено в конструкции его служебное назначение, как установлены нормы точности, насколько эффективны выбранные методы достижения требуемой точности и как они воплощены в технологии изготовления изделия.

Для осуществления сборочных операций и выпуска готовых изделий высокого качества необходимо определить их служебное назначение, конструкцию, технические требования, выбрать вид и организационную форму производственного процесса, методы сборки, определить последовательность соединения деталей и сборочных единиц, выбрать методы регулирования и контроля качества сборки, оборудование и средства сборки.

Для организации сборочного производства на малом предприятии необходимо оценить и изучить состав, очередность и сложность сборки изделий, чтобы в дальнейшем обеспечить бесперебойное поступление деталей и узлов на сборку.

Общая схема последовательности сборки изделий приведена на рис. 1. Согласно схеме для осуществления автоматизированных расчетов на ЭВМ с помощью разработанного программного обеспечения необходимо внести в базу данных информацию об имеющемся сборочном оборудовании, технологических приспособлениях и деталях. Детали необходимо разбить на две категории: изготовляемые на собственном производстве и закупаемые на сторонних предприятиях. Это необходимо для выстраивания графика производства и выпуска изделий согласно методу прогноза MRP (календарное планирование поставок). Наиболее важные показатели, которые необходимо рассчитать, – время, стоимость работ, оборудования и инвентаря [1]. Также учитывается стоимость закупаемых деталей.

Для точного расчета затрат на сборку и выпуск изделий необходимо ввести и учесть коэффициенты, представленные в блоке № 2 рис. 1:

- $K_т$ – коэффициент технологичности конструкции;
- $K_м$ – коэффициент массы изделия;
- $K_{авт}$ – коэффициент автоматизации;
- $K_{чд}$ – коэффициент числа деталей.

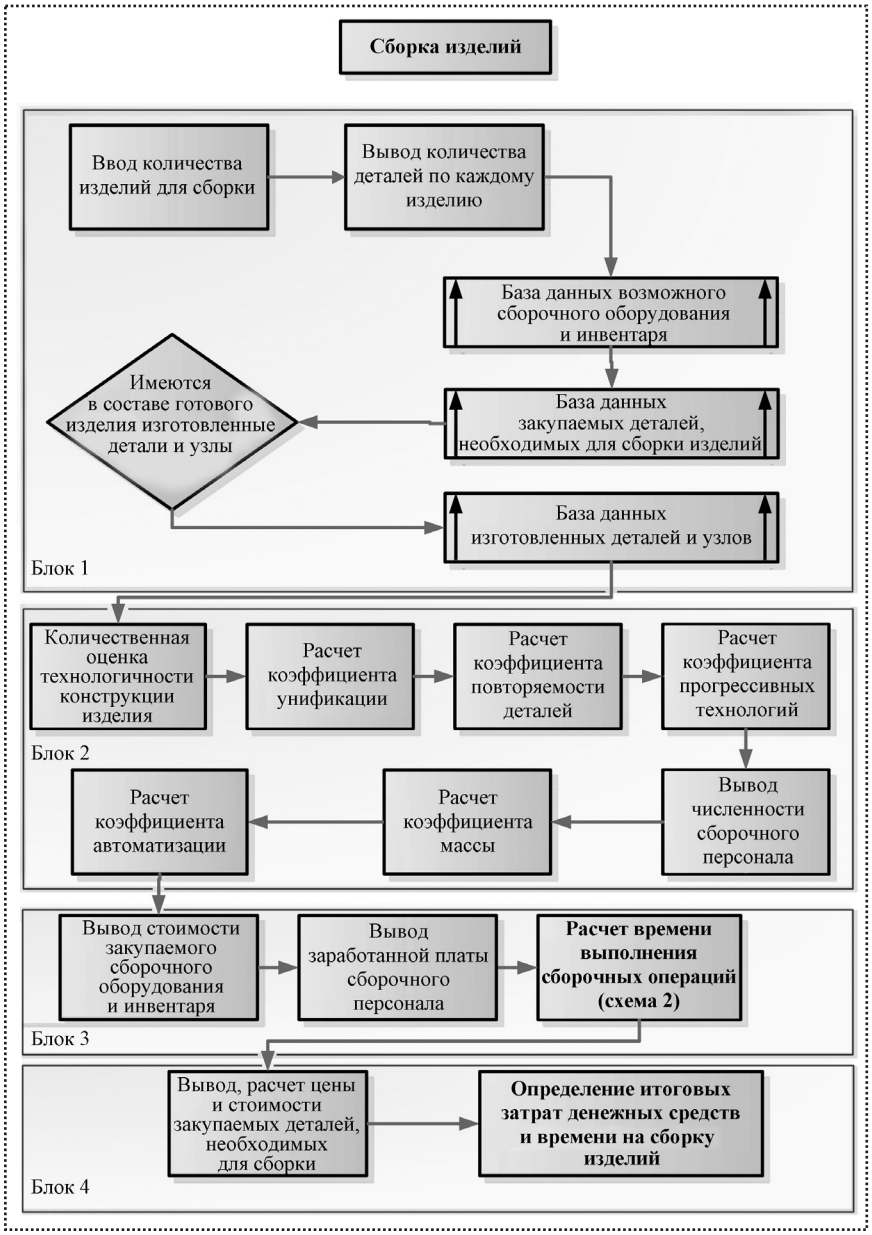

Рис. 1. Процесс сборки изделий

Коэффициент технологичности конструкции

$$K_{\text{т}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i E_i}{\sum_{i=1}^{n} E_i}, \qquad (1)$$

где K_i – частный коэффициент;

E_i – соответствующий коэффициент экономической эквивалентности;

n – количество коэффициентов.

Каждый из частных коэффициентов характеризует определенное свойство конструкции. Все частные коэффициенты имеют предел, равный единице. Коэффициенты экономической эквивалентности, значения которых нормированы, характеризуют экономическое соотношение (удельный вес) частных коэффициентов, к которым относятся:

– *коэффициент унификации*, характеризующий степень насыщенности изделия унифицированными деталями:

$$K_{\text{у}} = \frac{N_{\text{у}}}{N_{\text{общ}}} = \frac{N_{\text{у}}}{N_{\text{у}} + N_{\text{ор}}}, \qquad (2)$$

где $N_{\text{у}}$ – количество унифицированных и стандартных деталей, шт.;

$N_{\text{общ}}$ – общее количество деталей в изделии, шт.;

$N_{\text{ор}}$ – количество оригинальных деталей, шт.;

– *коэффициент повторяемости* оригинальных деталей

$$K_{\text{пов. ор.}} = 1 - \frac{N_{\text{т.р.ор.}} - 1}{N_{\text{ор}}}, \qquad (3)$$

где $N_{\text{т.р.ор}}$ – суммарное количество типоразмеров (наименований) оригинальных деталей;

$N_{\text{ор}}$ – суммарное количество оригинальных деталей, шт.;

– *коэффициент применяемости прогрессивных технологий*, характеризующий степень насыщенности оборудования деталями, изготавливаемыми прогрессивными методами:

$$K_{\text{п.т.}} = \frac{N_{\text{I}} + N_{\text{V}} + N_{\text{VI}}}{N_{\text{общ}}^{\text{III}}} = \frac{N_{\text{I}} + N_{\text{V}} + N_{\text{VI}}}{N_{\text{I}} + N_{\text{II}} + N_{\text{III}} + N_{\text{IV}} + N_{\text{V}} + N_{\text{VI}}}, \qquad (4)$$

где $N_{I}...N_{VI}$ – суммарное количество деталей, изготавливаемых:

N_{I} – штамповкой;

N_{II} – на станках токарной группы;

N_{III} – на фрезерных, строгальных и плоско-шлифовальных станках;

N_{IV} – на специальных станках или сложных приспособлениях;

N_{V} – литьем и методами горячего деформирования металлов;

N_{VI} – прочими прогрессивными методами (прессованием, физико-химической обработкой);

$N^{III}_{общ}$ – суммарное количество всех изготавливаемых деталей, шт.

Коэффициент массы изделия: $K_{м} = 1$ при массе изделия до 25 кг и $K_{м} = 0,85$ – от 25 до 63 кг, так как рассматривается малое предприятие с применением только несложных технических средств и ручного труда.

Коэффициент числа деталей

$$K_{чд} = 1{,}035e^{-0{,}0162n}, \qquad (5)$$

где n – количество деталей в изделии.

Коэффициент автоматизации

$$K_{авт} = 1 - \frac{t_{ф}}{t_{0}}, \qquad (6)$$

где $t_{ф}$ – время работ, выполняемых вручную;

t_{0} – время, необходимое для выполнения всех переходов при сборке изделия.

В автоматизированном производстве время, необходимое для выполнения всех переходов при сборке изделия, включает в себя время работ, выполняемых на автоматических позициях оборудования и вручную. С учетом всех рассмотренных коэффициентов согласно блоку 3 (см. рис. 1) необходимо определить численность рабочих, время выполнения сборочных операций (рис. 2) и затраты на оплату труда.

С точки зрения нормирования все слесарно-сборочные работы могут быть разделены на четыре основные группы [2]:

– вспомогательные — промывка, протирка деталей, извлечение сборочных узлов, агрегатов и приспособлений, подбор и проверка входящих в сборку деталей, их клеймение, маркировка и т.п.;

Рис. 2. Определение времени сборки изделий

– обработочные — все работы по снятию технологических припусков всеми видами инструментов: развертывание отверстий, нарезка и прогонка резьбы, притупление острых углов, притирка, подгонка и др.;

– установочные и регулировочные — работы по установке деталей, узлов, агрегатов и готовых изделий в положение, предусмотренное конструкцией изделия; контрольные проверки правильности и точности установки; работы, связанные с регулировкой собираемых узлов и изделий; закрепление фиксаторами и зажимами устанавливаемых в сборочных приспособлениях деталей, узлов, агрегатов (наиболее ответственная часть сборочных работ);

– сборочно-установочные — закрепление установленных деталей, узлов, агрегатов и готовых изделий с помощью деталей, обеспечивающих получение разъемных и неразъемных соединений.

Количество R рабочих сборщиков определяется в зависимости от времени занятости и по числу "ручных" позиций с добавлением некоторого числа рабочих, обслуживающих автоматические позиции:

$$R = P_{\text{р}} + (0{,}2\ldots0{,}4)P_{\text{а}}, \qquad (7)$$

где $P_{\text{р}}$ и $P_{\text{а}}$ – число "ручных" и автоматических позиций сборки.

Основная заработная плата $C_{\text{з.п.}}$, премии $C_{\text{прем}}$, отчисления на социальное страхование $C_{\text{соц}}$ вычисляются по формулам:

$$C_{\text{з.п.}} = \sum_i C_{\text{тар}_i} \frac{F_i}{F_{\text{м}}}; \qquad (8)$$

$$C_{\text{прем.}} = C_{\text{з.п.}} k_{\text{прем.}}; \qquad (9)$$

$$C_{\text{соц}} = (C_{\text{з.п.}} + C_{\text{прем.}} + C_{\text{д.з.п.}})k, \qquad (10)$$

где $C_{\text{тар}_i}$ – тарифная ставка работников;

F_i – рабочий фонд времени;

$F_{\text{м}}$ – среднее количество рабочих дней в месяце ($F_{\text{м}} = 21$);

$k_{\text{прем.}}$ – коэффициент премии ($k_{\text{прем.}} = 0{,}35$);

k – коэффициент отчислений ($k = 0{,}279$).

В слесарно-сборочных работах как основные, так и вспомогательные трудовые приемы являются "ручными", поэтому при нормировании оперативное время на многопереходную сборочную операцию не подразделяется на основное и вспомогательное. При нормировании сборочных работ учитывается тип производства, в котором выполняется работа.

В основу разработки нормативов времени по слесарным и слесарно-сборочным работам приняты следующие данные:

– хронометражные наблюдения;

– фотографии рабочего времени;

– результаты анализа организации труда по сборочным процессам.

В результате сбора информации по определению времени определяется штучное время [3], которое равно сумме времени на слесарные и слесарно-рабочие работы, необходимые для сборки узла:

$$T_{\text{шт}} = (T_{\text{уст}} + T_{\text{в}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{пр}} + T_{\text{кр}})\text{K}_1\text{K}_2, \qquad (11)$$

где $T_{\text{уст}}$ — время на установку детали, узла, агрегата;

$T_{\text{в}}$ — время вспомогательных работ;

$T_{\text{обр}}$ — время проведения слесарно-сборочных работ;

$T_{\text{пр}}$ — время на проверку и контроль выполненной работы;

$T_{\text{кр}}$ — время на крепежные работы;

K_1, K_2 — поправочные коэффициенты, учитывающие величину партии собираемых изделий и условия проведения работ.

С целью упрощения расчета норм времени в таблицах нормативов в норму штучного времени включено подготовительно-заключительное время, время обслуживания рабочего места и время перерывов на отдых и личные надобности в размере 11 % от оперативного времени.

Норма времени на слесарно-сборочные работы:

$$\text{H}_{\text{вр}} = (\sum T_{\text{оп2разр}} + \sum T_{\text{оп3разр}}\text{K} + \sum T_{\text{оп4разр}}) \times \times (1 + (a_{\text{пз}} + a_{\text{абз}} + a_{\text{отл}})/100)\text{K}_1\text{K}_2, \qquad (12)$$

где $\sum T_{оп}$ – сумма оперативного времени на выполнение приемов и комплексов приемов слесарно-сборочных работ по сетке разрядов рабочих;

$a_{пз}$, $a_{абз}$, $a_{отл}$ — соответственно подготовительно-заключительное время, время обслуживания рабочего места, время на отдых и личные надобности в % от оперативного времени;

K, K_1, K_2 — коэффициенты, учитывающие соответственно тип производства, число деталей в партии и условия выполнения работ.

При коллективной форме организации труда комплексные нормы затрат труда рабочих могут быть получены на основе применения корректирующих коэффициентов к сумме операционных норм, рассчитанных для индивидуальной формы организации труда, поэтому на рис. 2 итоговый результат – расчет комплексной нормы времени

$$Н_{вр} = \sum_{i=1}^{n} Н_{вр\,i} K_{эф}, \qquad (13)$$

где $Н_{вр\,i}$ — норма времени на выполнение i-й операции бригадокомплекта, чел.-ч;

i — количество операций, необходимых для изготовления изделия (i = 1, 2, ..., n);

$K_{эф}$ — коэффициент эффекта бригадной работы, который отражает среднюю величину роста производительности труда, ожидаемую при переходе от индивидуальной формы организации труда к комплексной, и учитывается в комплексных нормах ($K_{эф} < 1$).

На основании данных об оборудовании, деталях, узлах, времени сборки, количестве производственного персонала согласно блоку 4 (см. рис. 1) проводят итоговый расчет затрат денежных средств и времени выполнения всех операций по сборке изделий.

Анализ эффективности структуры сборки изделий является трудоемким процессом, поэтому необходимо данный процесс автоматизировать. На основе разработанной блок-схемы (см. рис. 1) возможно создать программный продукт, который в автоматическом режиме, используя исходные данные о программе выпуска изделия, имеющемся сборочном оборудовании, оснастке, производственных площадях и т.п., осуществляет все необходимые расчеты.

Таким образом, для организации качественного сборочного процесса на малом предприятии надо выполнить следующие задачи:

- *создать программное обеспечение, позволяющее ввести подробную информацию об инвестициях, площадях, оборудовании, персонале в базу данных компьютера для выполнения точных расчетов эффективности производства;*
- *разработать систему расчета для определения затрат на сборку изделия;*
- *разработать систему расчета для определения времени выполнения сборочных операций;*
- *разработать интерфейс для удобного выполнения расчетов в действующем на основании представленной блок-схемы программном продукте.*

Библиографический список

1. **Найджел С., Чеймберс С., Джонстон Р.** Организация, планирование и проектирование производства. Операционный менеджмент / Пер. с 5-го англ. изд. М.: ИНФРА-М, 2009. 114 с.

2. **Седель О.Я.** Техническое нормирование. М.: ООО "Новое знание", 2010. С. 236–237.

3. **Новицкий Н.И.** Организация, планирование и управление производством. М.: Кнорус, 2006. 142 с.

УДК 621.791.75.01

И.В. Арефьев, *инж.,* **И.Е. Лапин,** *д-р техн. наук,*
В.Н. Стяжин, А.В. Савинов, *канд-ты техн. наук,*
В.И. Лысак, *д-р техн. наук,* **О.А. Полесский,** *канд. техн. наук*
(Волгоградский государственный технический университет)
E-mail: straga5@yandex.ru

Моделирование тепловых процессов локальной электродуговой термообработки сварных соединений неплавящимся электродом

Разработана модель тепловых процессов при локальной дуговой термообработке движущимся нормально распределенным источником нагрева с использованием программного пакета Heat Transfer by Conduction (COMSOL Multiphysics) с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры, возможностью применения поперечных колебаний пятна нагрева и импульсного изменения теплового потока.

The model of thermal processes is developed at local arc heat treatment by the moving normally distributed source of heating for the decision by means of software package Heat Transfer by Conduction (COMSOL Multiphysics) taking into account change thermalphysic properties of a material from temperature and possibility of application of cross-section fluctuations of a stain of heating and pulse change of a thermal stream.

Ключевые слова: сварка, моделирование, термический цикл, неплавящийся электрод, остаточные напряжения.

Keywords: welding, modeling, the thermal cycle, non-melting electrode, residual stress.

Обеспечение низких остаточных сварочных напряжений наряду с высокими показателями пластичности, ударной вязкости, прочности сварного соединения является достаточно сложной задачей, которую обычно решают за счет снижения скорости охлаждения металла шва и зоны термического влияния посредством предварительного, сопутствующего и последующего подогревов, многослойной сварки, печного отпуска после сварки, местной термообработки сварного соединения токами промышленной и высокой частоты, тепловыделяющими элементами и др. [1, 2]. Вышеуказанные меры отличаются высокой трудоемкостью, что снижает производительность работ, существенно увеличивает их стоимость, ограничивая тем самым возможность их применения, особенно при изготовлении и ремонте крупногабаритных конструкций [3].

Известны примеры использования высококонцентрированных источников нагрева для местной обработки сварного соединения – электронного луча [4, 5] и плазмы [6], но для реализации этих способов необходимо специальное дорогостоящее оборудование.

Наименее трудоемким и технологичным способом улучшения структуры и свойств металла сварных соединений, повышения их долговечности при ударных и циклических нагружениях является электродуговая обработка неплавящимся электродом. При этом преимущественно используют обработку с оплавлением поверхности металла шва или переходной зоны [7].

Локальная дуговая термообработка без оплавления мало изучена, а определение оптимальных ее параметров, обеспечивающих решение поставленных задач, является актуальной задачей сварочного производства. Достичь выполнения указанных требований на основе оптимизации параметров режима в условиях поперечных колебаний дуги, импульсного изменения вводимой энергии с учетом нормального распределения теплового потока

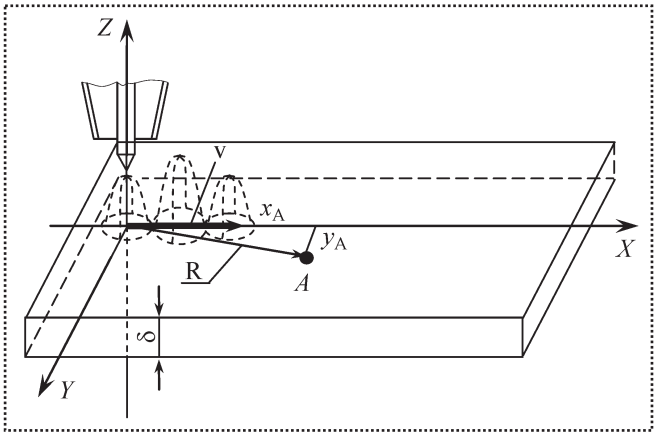

Рис. 1. Расчетная схема нагрева пластины

в обрабатываемый металл возможно методами математического моделирования.

Рассмотрим модель нагрева пластины толщиной δ движущимся источником теплоты с нормальным распределением теплового потока (рис. 1). Принимаем во внимание следующие варианты электродугового нагрева:

– с постоянной эффективной тепловой мощностью $q_и$ (стационарный режим);

– с динамическим изменением эффективной тепловой мощности за счет наложения импульсов тока $I_и$ (рис. 2) на базовый ток $I_б$ (импульсный режим) при различных параметрах длительности импульса $t_и$ и базового тока $t_б$;

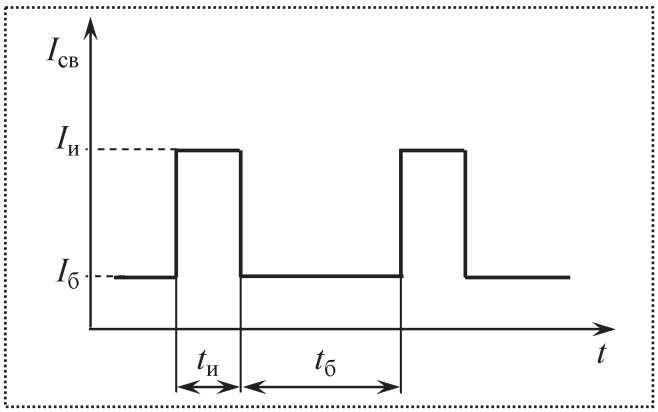

Рис. 2. Изменение тока дуги при импульсно-дуговой термообработке:
$I_б$ – ток основной дуги (базовый);
$I_и$ – ток дуги во время импульса;
$t_б$ – длительность паузы;
$t_и$ – длительность импульса тока

– в стационарном и импульсных режимах с наложением поперечных колебаний.

В рассматриваемой модели учитываются потери на излучение и конвективный обмен с окружающей средой, а теплофизические коэффициенты рассматриваются как функции температуры.

При отсутствии теплообмена трехмерного тела с окружающим пространством общее уравнение теплопроводности имеет вид [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\lambda}{c\rho}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)=a\nabla^2 T, \qquad (1)$$

где T – температура поверхности тела;

$a=\frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности материала;

λ – коэффициент теплопроводности;

$c\rho$ – объемная теплоемкость;

$\nabla^2 T$ – оператор Лапласа.

При использовании сварочных источников нагрева, принимая во внимание теплоотдачу с поверхностей рассматриваемой пластины, расчеты проводили с помощью дифференциального уравнения Фурье:

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\lambda}{c\rho}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)-b(T-T_с), \qquad (2)$$

где $b=\frac{2\alpha}{c\rho\delta}$ – коэффициент температуроотдачи пластины толщиной δ;

α – коэффициент поверхностной теплоотдачи;

$T_с$ – температура окружающей среды.

Температурное поле от быстродвижущегося нормально распределенного источника в любой точке пластины

$$T(x;\ R)=T_н+\frac{q\exp(-kr^2)}{2\pi\lambda\delta}\times \\ \times\exp\left(-\frac{vx}{2a}\right)K_0\left(R\sqrt{\frac{v^2}{4a^2}+\frac{b}{a}}\right), \qquad (3)$$

где $T_н$ – начальная температура пластины;

q – эффективная тепловая мощность источника нагрева;

k – коэффициент сосредоточенности источника;

$r = \frac{3{,}46}{2k}$ [3] – радиус пятна нагрева;

K_0 – функция Бесселя от аргумента $R\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}$;

$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – расстояние до заданной точки с координатами x, y, z, в которой необходимо определить температуру (см. рис. 1);

v – скорость перемещения источника нагрева.

В формуле (3) коэффициент k и радиус пятна нагрева r принимаются скалярными величинами, не зависящими от времени, в связи с чем данное выражение можно применять для расчетов тепловых полей от импульсных источников нагрева с некоторой погрешностью.

Тепловой поток от нормально распределенного движущегося источника нагрева с учетом импульсного изменения во времени:

$$q_и = I_{св}(t) U_д \eta_и \exp(-k((x - vt)^2 + y^2)), \quad (4)$$

где $$I_{св}(t) = I_б + \left[\frac{t - (t_и + t_б)\left[\frac{t}{t_и + t_б}\right]}{t_б}\right](I_и - I_б)$$ – функция изменения сварочного тока во времени (рис. 2) при $t_и < t_б$;

$r^2 = (x - vt)^2 + y^2$;

$U_д$ – напряжение дуги;

$\eta_и$ – эффективный КПД процесса нагрева изделия дугой, характеризующий долю теплоты сварочного источника, вводимую в основной металл.

Характер перемещения электрода $y(t)$ при термообработке поперечными колебаниями дуги определяется с помощью функции Хевисайда $H(t)$, цикличность которой в COMSOL Multiphysics задается синусоидальной зависимостью

$$y(t) = y + (H(t)\sin(\omega t) - 0{,}05, c)n,$$

где y – коэффициент, учитывающий смещение оси колебаний относительно оси сварного шва;

c – коэффициент, позволяющий выбрать форму колебаний от прямоугольной до синусоидальной;

n – коэффициент, определяющий амплитуду колебания;

ω – частота колебаний электрода.

При подстановке выражения (4) в (3) для импульсного источника получим

$$T(x;R) = T_н + \frac{I_{св} U_д \eta_и \exp(-k((x - vt)^2 + y^2))}{2\pi\lambda\delta} \times \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right). \quad (5)$$

С помощью данной модели получены тепловые поля (рис. 3) и термические циклы (рис. 4, см. 3-ю с. обложки) для различных схем локальной термообработки неплавящимся электродом (рис. 5), анализ которых свидетельствует о высокой скорости охлаждения металла зоны термического влияния как для сварочного источника нагрева постоянной мощности, так и для импульсного. Интенсивное снижение температуры со скоростью $W_{охл}$ > 12 °С/с способствует образованию высоких остаточных сварочных напряжений и ухудшению механических свойств, в связи с чем необходимо принятие специальных мер.

Эффективный метод уменьшения остаточных сварочных напряжений – применение поперечных колебаний (рис. 5, *б*), оптимальный выбор параметров которых значительно снижает максимальную температуру (T_{max} = 750...800 °С), исключая вероятность оплавления поверхностного слоя металла (см. рис. 4). При этом скорость охлаждения уменьшается (менее 12 °С/с), что исключает вероятность образования закалочных

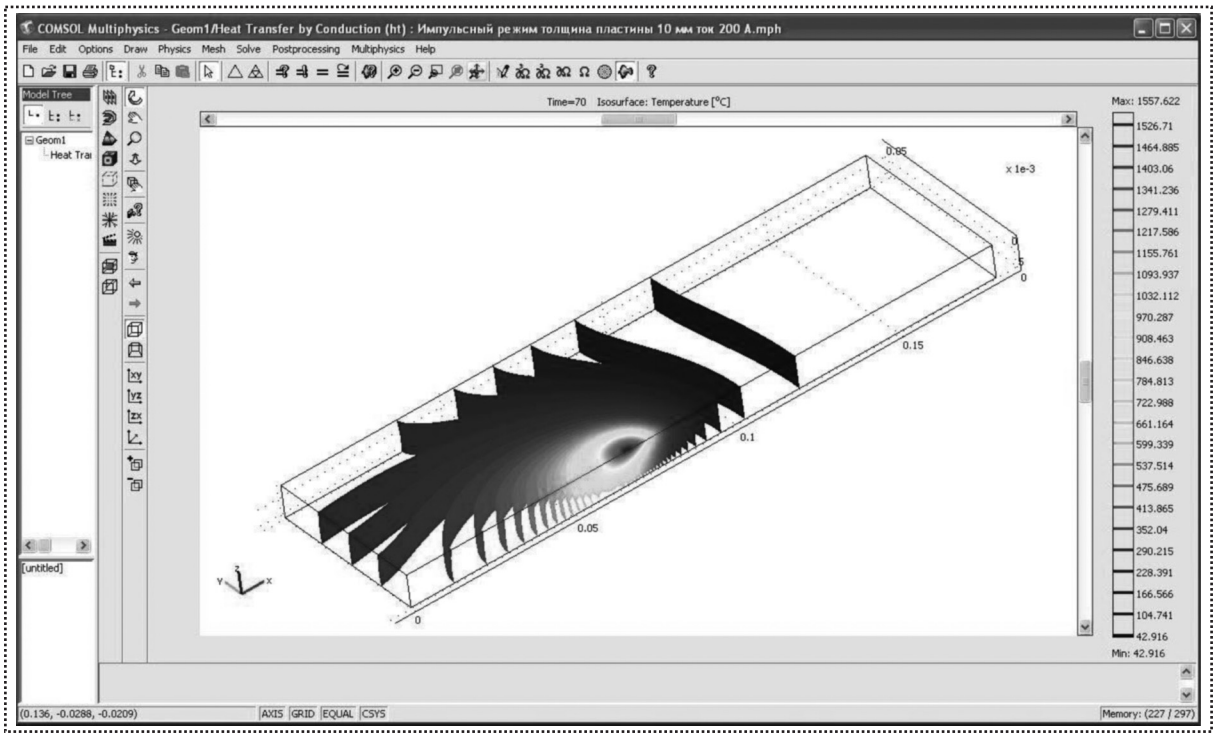

Рис. 3. Изотермы температурного поля при дуговой термообработке в постоянном режиме:
$I_д$ = 200 А; $U_д$ = 12 В; q = 1800 Дж/с; v = 0,1 см/с; k = 3 см$^{-2}$; δ = 10 мм

структур и улучшает механические свойства сварного соединения.

Применение импульсной термообработки неплавящимся электродом с поперечными колебаниями способствует также уменьшению сварочных напряжений в металле шва и зоны термического влияния [8].

Один из способов решения поставленной задачи заключается в снижении силового и тем-

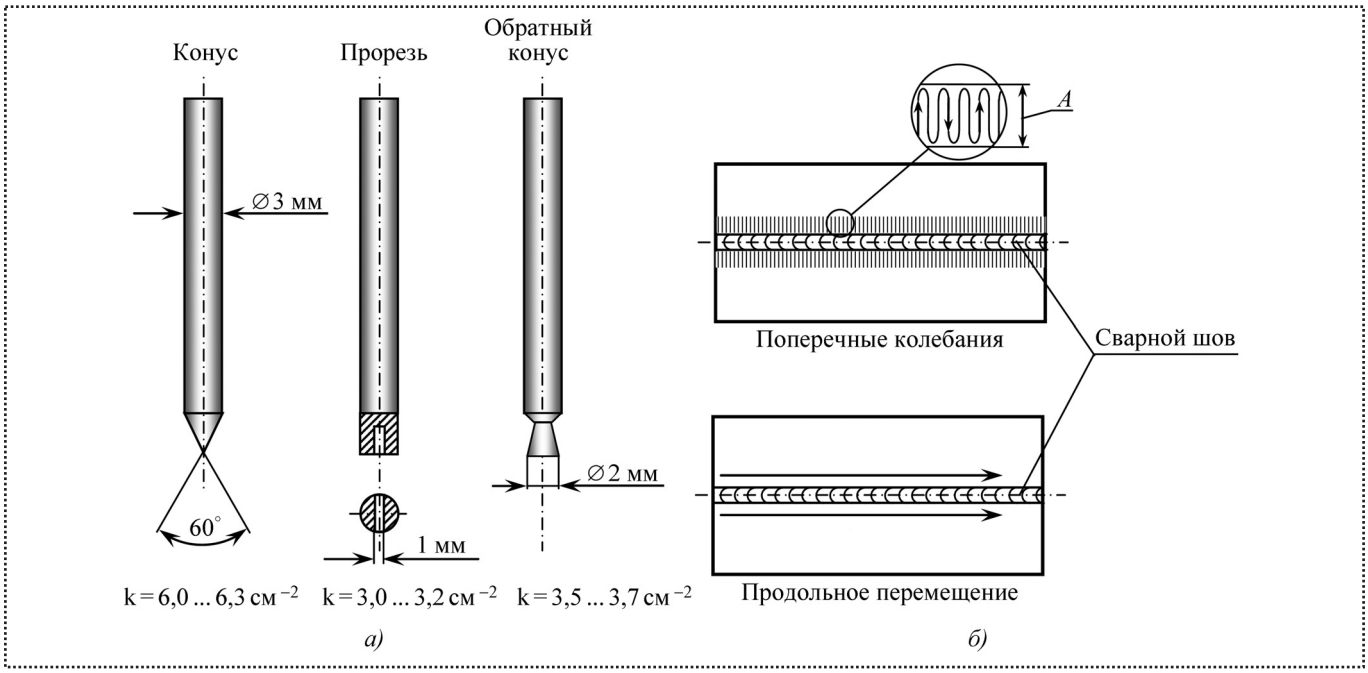

Рис. 5. Неплавящиеся электроды (*а*) и схемы перемещений источника (*б*), применяемые при электродуговой термообработке

пературного воздействия на металл обрабатываемого сварного соединения за счет изменения геометрии рабочего участка неплавящегося электрода с целью получения требуемого коэффициента сосредоточенности. Так, например, применение электрода с рабочей поверхностью в виде обратного конуса (патент РФ № 63279) или поперечной прорези (патент РФ № 88308) приводит к получению более распределенного теплового потока с коэффициентом сосредоточенности k = 3,0...3,5 см$^{-2}$ (рис. 5, *а*) и снижению объема ванны расплавленного металла.

Сравнительный анализ термических циклов термообработки неплавящимся электродом, заточенным на конус (см. рис. 4, *а*) и циклограмм, полученных в процессе термообработки электродом с рабочим участком, по оси которого выполнена одна поперечная прорезь (см. рис. 4, *б*), свидетельствует о снижении температуры T_{max} на 200...350 °С и скорости охлаждения в металле зоны термического влияния до 10 °С/с (стационарный режим).

Выводы

Разработанная модель позволяет рассчитывать оптимальные параметры дуговой термообработки неплавящимся электродом с поперечными колебаниями дуги в стационарном и импульсном режимах, обеспечивающие термические циклы с низкими значениями скорости охлаждения и максимальной температуры нагрева.

Применение электродов, обеспечивающих горение дуги с низким коэффициентом сосредоточенности, дает возможность реализации мягких термических циклов процесса термообработки без оплавления поверхности металла.

Библиографический список

1. **Казаков Ю.В.** Приближенная оценка эффективности операции снятия остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварочное производство. 2004, № 10. С. 41–44.

2. **Теория** сварочных процессов. / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др. Под ред. В.В. Фролова. М.: Высшая школа, 1988. 559 с.

3. **Корольков П.М.** Оборудование и технология объемной термической обработки газопламенным нагревом крупногабаритных сосудов давления в монтажных условиях // Сварочное производство. 2001, № 9. С. 39–43.

4. **Bianco N., Manca O., Nardini S., Tamburrino S.** A Numerical Model for Transient Heat Conduction in Semi-Infinite Solids Irradiated by a Moving Heat Source, COMSOL Users Conference, 2008, Hannover.

5. **Bianco N., Manca O., Nardini S., Tamburrino S.** Transient heat conduction in solids irradiated by a moving heat source, COMSOL Users Conference, 2006, Milano, 14 Novembre.

6. **Патент № 2121514 RU, МКИ С 21 К 1/09.** Способ плазменной термической обработки изделий и устройство для его осуществления / А.М. Лыков, Ю.И. Матвеев. 1998.

7. **Аргонодуговая** обработка границ шва сварных труб большого диаметра из сталей 09Г2ФБ и Х-70 / Ю.И. Райчук, А.Д. Лючков, Л.И. Гузеватая и др. // Автоматическая сварка. 1983. № 10. С. 67–68.

8. **Снижение** уровня макро- и микронапряжений в наплавленном металле при восстановлении крупногабаритных конструкций / И.В. Арефьев, А.В. Савинов, И.Е. Лапин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009, № 10. С. 41–46.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".
Адрес электронной почты издательства: **E-mail: mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru; tsmm@mashin.ru http://www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.
Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 18.01.11 г. Подписано в печать 15.03.11 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 5,55 Заказ 125. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.