ve1219.fm Page 1 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал переводится на английский язык, переиздается и распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс" (США)

12

2019

Главный редактор **А.И. САВКИН**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, **Алешин Н.П.,** д-р техн. наук, акад. РАН, **Братухин А.Г.,** д-р техн. наук, **Воронцов А.Л.,** д-р техн. наук, **Гусейнов А.Г.,** д-р техн. наук, **Дмитриев А.М.,** д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), **Драгунов Ю.Г.,** д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Древаль А.Е.,** д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), **Кутин А.А.,** д-р техн. наук, **Омельченко И.Н.,** д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), **Кузин В.В.,** д-р техн. наук, **Попов Д.Н.,** д-р техн. наук, **Попов А.В.,** д-р техн. наук, **Рыбин В.В.,** д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Трегубов Г.П.,** д-р техн. наук, **Сычев А.П.,** канд. физ.-мат. наук, **Скугаревская Н.В.** (ответственный секретарь)

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

Адрес издательства:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(499) 269-51-98

Адрес редакции:

107076, Москва,
Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(495) 661-38-80.
E-mail: vestmash@mashin.ru; vestmash@mail.ru
www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за ПИ № 77-12421 в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Учредитель: А.И. Савкин

Индекс: **27841** ("Пресса России")
Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер",
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.
Сайт: **www.aov.ru**

ve1219.fm Page 2 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Привалова О. В., Свияженинов Е. Д., Фридман В. М. — Эффективный метод приближенного решения задачи о нелинейных периодических колебаниях механической системы . . . 3

Афонин С. М. — Кодовое управление многослойным пьезоактюатором нано- и микроперемещений . . . 7

Соловьев Д. А., Журавлева Л. А. — Исследование влияния конструктивных параметров дождевателей на формирование дождя . . . 11

Юсупов А. К., Муселемов Х. М., Устарханов Т. О., Джалалов Ш. Г. — Исследование металлодеревянной балки . . . 16

Лазарев С. И., Ковалев С. В., Ковалева О. А., Коновалов Д. Н. — Разработка конструкции и расчет эффективной площади мембран и общего объема разделяемого раствора в электробаромембранном аппарате рулонного типа . . . 21

Верещака С. М., Жигилий Д. А., Данильцев В. В. — Определение прочности кольцевых образцов из стеклопластика на основе метода разрезного диска . . . 25

Шишкин С. В. — Об экспериментальной оценке фреттингостойкости роликовых опор . . . 34

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Груздев А. А., Моргунов Ю. А., Саушкин Б. П., Хомякова Н. В. — Электроэрозионная прошивка отверстий малого диаметра в фильтрах с наложением ультразвука . . . 39

Козлов А. А., Боровик И. Н., Ермашкевич А. А., Ташев В. П., Гусейнов Ш. Л., Косых В. А. — Исследование процесса самовоспламенения топлива, состоящего из высококонцентрированной перекиси водорода, керосина и пирофорных добавок . . . 45

Беляева И. А., Глущенков В. А. — Гибридные и комбинированные технологии статического и магнитно-импульсного нагружения в листоштамповочном производстве . . . 50

Жарков В. А. — Гибка листов и профилей на четырехвалковой машине для корпусов ракет, трубных и каркасных изделий. Часть 2 . . . 53

Калашников А. С., Моргунов Ю. А., Васильев А. Н., Аббясов В. М. — Особенности технологии изготовления конических колес с круговыми зубьями в малоотходном производстве . . . 62

Проблемы теории и практики резания материалов

Еренков О. Ю. Яворская Е. В., Яворский Д. О., Каленский А. М. — Предварительная обработка поверхностно-активными веществами заготовок из полимерных композиционных материалов для повышения качества точения . . . 66

Обработка материалов без снятия стружки

Кравченко Г. Н., Кравченко К. Г. — Обоснование эффективности восстановления усталостной долговечности поверхностно-упрочненных авиационных деталей повторным упрочнением дробью . . . 69

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Калмыков Ю. П. — Проблемы и перспективы развития автомобильной промышленности в России . . . 75

Омельченко И. Н., Лазаренко А. Г. — Принципы инженерного проектирования . . 79

Указатель статей, опубликованных в журнале "Вестник машиностроения" за 2019 г. . . . 83

CONTENTS

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Privalova O. V., Sviyazheninov E. D., Fridman V. M. — An effective method for approximate solution of the problem of nonlinear periodic oscillations of a mechanical system

Afonin S. M. — Code control on a multilayer piezoactuator of nano and micro displacements

Solov'ev D. A., Zhuravleva L. A. — Research of the influence of the design parameters of sprinklers on rain formation

Yusupov A. K., Muselemov Kh. M., Ustarkhanov T. O., Dzhalalov Sh. G. — Research of a metal-wooden beam

Lazarev S. I., Kovalev S. V., Kovaleva O. A., Konovalov D. N. — Development of the design and calculation of the effective area of membranes and the total volume of the solution to be separated in a roll-type electric baromembrane apparatus

Vereshchaka S. M., Zhigiliy D. A., Danil'tsev V. V. — Strength determination of fiberglass ring specimens based on the split disc method

Shishkin S. V. — On an experimental evaluation of the fretting resistance of roller bearings

MANUFACTURING ENGINEERING

Gruzdev A. A., Morgunov Yu. A., Saushkin B. P., Khomyakova N. V. — Electroerosive broaching of small-diameter holes in filters with superposition of ultrasound

Kozlov A. A., Borovik I. N., Ermashkevich A. A., Tashev V. P., Guseynov Sh. L., Kosykh V. A. — Research of the process of self-ignition of fuel, consisting of highly concentrated, hydrogen peroxide, kerosene and pyrophoric additives

Belyaeva I. A., Glushchenkov V. A. — Hybrid and combined technologies of static and magnetic-pulse loading in sheet-stamping production

Zharkov V. A. — Bending of sheets and profiles on a four-roll machine for rocket bodies, tube and frame products. Part 2

Kalashnikov A. S., Morgunov Yu. A., Vasil'ev A. N., Abbyasov V. M. — Features of the manufacturing technology of bevel gears with circular teeth in low-waste production

Problems of theory and practice of materials cutting

Erenkov O. Yu., Yavorskaya E. V., Yavorskiy D. O., Kalenskiy A. M. — Pre-treatment of billets from polymer composite materials by surface-active substances to improve the quality of turning

Chipless processing of materials

Kravchenko G. N., Kravchenko K. G. — Justification of the effectiveness of restoring the fatigue life of surface hardened aircraft parts by repeated shot peening

ECONOMY AND ORGANIZATION OF PRODUCTION

Kalmykov Yu. P. — Problems and prospects for the development of the automobile industry in Russia

Omelchenko I. N., Lazarenko A. G. — Principles of engineering design

Index of papers having been published in the "Vestnik mashinostroeniya" for 2019

Технический редактор *Т. А. Шацкая*
Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 28.09.2019. Подписано в печать 18.11.2019.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

© ООО «Издательство "Инновационное машиностроение"», "Вестник машиностроения", 2019

ve1219.fm Page 3 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 539.3

О. В. ПРИВАЛОВА, канд. техн. наук (СПб. Политехнический Университет), Е. Д. СВИЯЖЕНИНОВ, д-р техн. наук, В. М. ФРИДМАН, д-р техн. наук (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург), e-mail: sviage@gmail.com

Эффективный метод приближенного решения задачи о нелинейных периодических колебаниях механической системы

Предложен эффективный метод приближенного решения задачи о нелинейных периодических колебаниях механической системы, основанный на сочетании итерационного метода Ньютона—Канторовича и проекционного метода Галеркина. Предложенный метод сопоставлен с общепринятым подходом, когда периодическая задача решается заменой ее на задачу с заданными начальными условиями.

Ключевые слова: механическая система, нелинейные колебания, задачи о периодических колебаниях и с заданными начальными условиями, итерационный и проекционный методы расчета.

An effective method is proposed for the approximate solution of the problem of nonlinear periodic oscillations of a mechanical system, based on a combination of the Newton—Kantorovich iterative method and the Galerkin projection method. The proposed method is compared with the generally accepted approach, when a periodic problem is solved by replacing it with a problem with given initial conditions.

Keywords: mechanical system, nonlinear oscillations, problems of periodic oscillations and with given initial conditions, iterative and projection calculation methods.

Эффективный метод приближенного решения задачи о нелинейных периодических колебаниях механической системы основан на сочетании итерационного метода Ньютона—Канторовича и проекционного метода Галеркина [1]. Сравним этот метод с общепринятым подходом, при котором периодическая задача решается путем замены ее на задачу с заданными начальными условиями.

Для простоты рассуждений рассмотрим колебания элементарной механической модели — будем решать задачу о периодических вынужденных колебаниях массы, закрепленной на невесомой нелинейной пружине при действии на эту массу периодической силы. При этом будем считать, что к массе приложены также силы инерции и линейная сила трения. К уравнению колебаний

$$\ddot{u} + g\dot{u} + c(u) - p = 0 \qquad (1)$$

добавим условия периодичности:

$$u(0) = u(T); \quad \dot{u}(0) = \dot{u}(T), \qquad (2)$$

где $u = u(t)$ — перемещение массы, $0 \le t \le T$; t — время; T — период действия внешней силы и также период колебаний массы на пружине.

В уравнение (1) входят:

действующие на массу сила трения ($-g\dot{u}$), нелинейная сила натяжения пружины ($-c(u)$), а также периодическая внешняя сила (p), деленные на саму массу.

Условие периодичности внешней силы $p(t)$:

$$p(t) = p(t + T). \qquad (3)$$

Начнем с общепринятого метода решения задачи о периодических колебаниях путем замены ее на начальную задачу (с заданными начальными условиями).

Остановимся сначала на частном случае, когда внешняя сила — гармоническая функция времени, сила упругости пружины — линейная, масса, коэффициенты упругости и трения — постоянны. При этих допущениях для решения задачи могут быть даны аналитические оценки.

Уравнение (1) принимает вид:

$$\ddot{u} + g\dot{u} + cu - p = 0; \qquad (4)$$

$$p = p(t) = p^1 e^{i\omega t},$$

где p^1 — амплитуда и ω — частота изменения гармонической силы — постоянные положительные числа, и условия периодичности (2) выполнены при

$T = 2\pi/\omega$. Нетрудно увидеть, что периодическим решением этого уравнения будет:

$$u_* = u_*(t) = \frac{p^1}{(-\omega^2 + i\omega g + c)} e^{i\omega t}; \quad (5)$$

$$u_*(0) = u_*(T); \quad \dot{u}_*(0) = \dot{u}_*(T).$$

Теперь вместо периодической задачи (1), (2) рассмотрим начальную задачу с тем же уравнением (1), но с заданными начальными условиями:

$$u(0) = u_0; \quad \dot{u}(0) = v_0, \quad (6)$$

где u_0, v_0 — произвольные числа (поскольку сейчас рассматривается линейная задача).

Предположим, что в формуле (5) $t \geq 0$, и представим $u = u(t)$ — решение задачи (4), (6) — в виде суммы двух слагаемых:

$$u = u_* + y. \quad (7)$$

Очевидно, что функция $y = y(t)$, $t \geq 0$ удовлетворяет однородному уравнению

$$\ddot{y} + g\dot{y} + cy = 0 \quad (8)$$

и начальным условиям:

$$y(0) = u(0) - u_*(0); \quad \dot{y}(0) = \dot{u}(0) - \dot{u}_*(0). \quad (9)$$

Однородному уравнению (8) удовлетворяет степенная функция времени $y(t) = \alpha e^{\beta t}$, где коэффициент β принимает значения корней квадратного уравнения $\beta^2 + g\beta + c = 0$. Этими корнями являются: $\beta_1 = -h - k$; $\beta_2 = -h + k$, где $h = g/2$, $k = \sqrt{h^2 - c}$.

Для $h > 0$ вещественная часть числа k всегда будет меньше h [$Re(k) < h$]: при $h^2 > c$ это очевидно, а при $0 < h^2 \leq c$ имеем $Re(k) = 0$, откуда опять-таки следует $Re(k) < h$.

При этом решение задачи (8), (9) запишется как:

$$y(t) = e^{-ht}(\alpha_1 e^{kt} + \alpha_2 e^{-kt}),$$

где коэффициенты α_1 и α_2 определяются начальными условиями (9). Из приведенных формул видно, что при положительном коэффициенте трения $g = 2h > 0$ и $t \to \infty$ имеем $|y(t)| \to 0$ или согласно формуле (7)

$$|u(t) - u_*(t)| \to 0, \quad t \to \infty.$$

Иначе говоря, при гармонической силе и положительном коэффициенте трения решение задачи о колебаниях массы на пружине при заданных начальных условиях стремится к решению задачи об ее гармонических колебаниях.

Вернемся к нелинейной задаче. Одно уравнение (1) второго порядка заменим двумя уравнениями первого порядка:

$$\begin{cases} \dot{u} - v = 0; \\ \dot{v} + gv + c(u) - p = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Систему (10) уравнений можно записать иначе:

$$\dot{z} = L(z);$$
$$L(z) = A(z) + f, \quad (11)$$

т. е. ввести векторные функции времени:

$$z = (z_k); \quad f = (f_k); \quad k = 1, 2, \quad 0 \leq t \leq T; \quad (12)$$

$$z_1 = u(t); \quad z_2 = \dot{u}(t) = v(t); \quad f_1 = 0, \quad f_2 = p(t);$$

$$A(z) = \begin{pmatrix} z_2 \\ -c(z_1) - gz_2 \end{pmatrix}.$$

На основании равенств (3) и (12) неоднородный член в уравнении (11) $f = f(t)$, где $f(t) = f(t + T)$, является периодической функцией времени.

В исходной задаче задано условие периодичности

$$z(0) = z(T).$$

Заменим его на начальное условие

$$z(0) = z_0. \quad (13)$$

Выше было показано, что в линейном случае при гармоническом воздействии задача о периодических колебаниях при положительном трении может быть заменена на начальную задачу, решение которой в пределе стремится во времени к периодическому движению. Формально этот подход можно перенести и на случай нелинейных колебаний.

Для решения нелинейного уравнения (11) при заданных начальных условиях (13) могут быть применены численные методы, например типа Рунге—Кутта [2]. Однако в задачах о нелинейных колебаниях практически невозможно предложить легко проверяемый критерий сходимости. Убедиться в стремлении начального движения к периодическому можно только путем контрольного расчета. На практике метод, использующий замену периодической задачи на начальную, применяется в случаях, когда в колебательной системе действуют значительные силы трения. Таким образом, например, рассчитываются колебания валов, опирающихся на подшипники скольжения с масляной смазкой. Здесь существенные силы вязкого трения действуют в масляном слое подшипника.

Применим другой подход [3] к решению исходной нелинейной периодической задачи (1), (2). С этой целью используем сочетание итерационного метода Ньютона—Канторовича с проекцион-

ным методом Галеркина. Последовательные приближения итерационного метода будем вычислять по формуле

$$F'(u_n)w_n + F(u_n) = 0, \tag{14}$$

где n — номер приближения;

$$w_n = u_{n+1} - u_n; \tag{15}$$

$$F(u_n) = \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}u_n + g\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}u_n + c(u_n) - p;$$

$$F'(u_n)w_n = \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}w_n + g\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}w_n + k(u_n)w_n,$$

$$k(u_n) = \left.\frac{\mathrm{d}c(u)}{\mathrm{d}u}\right|_{u=u_n};$$

$$w_n(0) = w_n(T); \quad \dot{w}_n(0) = \dot{w}_n(T).$$

Согласно формуле (15) величина w_n характеризует изменение расчетного движения u_n на n-м шаге итерационного процесса (14).

Для приближенной реализации итерационной процедуры (14) воспользуемся проекционным методом.

Формула (14) для всех последовательных приближений имеет один и тот же вид. Поэтому пока опустим индекс n — номер приближения:

$$F'(u)w + F(u) = 0; \quad w(0) = w(T); \quad \dot{w}(0) = \dot{w}(T). \tag{16}$$

Согласно условию (3) внешняя сила $p(t)$ является периодической функцией времени, и ее можно приближенно представить в виде конечного гармонического ряда:

$$p(t) = \sum_{m=-M}^{M} p^m \mathrm{e}^{im\omega t}; \quad p^m = \frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-im\omega t}p(t)\mathrm{d}t, \quad \omega = 2\pi/T.$$

Это разложение может быть точным, если функция $p = p(t)$ не только периодическая, но и полигармоническая.

Представим также приближенно искомое периодическое движение $u(t)$ в виде гармонического ряда:

$$u(t) = \sum_{m=-M}^{M} a^m \mathrm{e}^{im\omega t}; \quad a^m = \frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-im\omega t}u(t)\mathrm{d}t. \tag{17}$$

При этом сразу выполняются условия периодичности (2).

Аналогично положим

$$w(t) = \sum_{m=-M}^{M} b^m \mathrm{e}^{im\omega t}; \quad b^m = \frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-im\omega t}w(t)\mathrm{d}t. \tag{18}$$

Коэффициенты ряда (17) определим из проекционных условий:

$$\frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-is\omega t}(F'(u)w + F(u))\mathrm{d}t = 0, \tag{19}$$

где

$$\frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-is\omega t}F'(u)w\mathrm{d}t =$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-is\omega t}\left(\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}w + g\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}w + k(u)w\right)\mathrm{d}t =$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-is\omega t}(-(s\omega)^2 w + igs\omega w + k(u)w)\mathrm{d}t. \tag{20}$$

В формуле (20) интегралы вычислены по частям и использованы условия периодичности (16).

Подставляя в формулу (20) представление $w(t)$ в виде ряда (18) и используя свойство ортонормирования $\frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-is\omega t}\mathrm{e}^{im\omega t}\mathrm{d}t = \delta_{sm}$ — символ Кронекера, получим:

$$\frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-is\omega t}F'(u)w\mathrm{d}t =$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{e}^{-is\omega t}(-(s\omega)^2 + igs\omega + k(u)) \sum_{m=-M}^{M} b^m \mathrm{e}^{im\omega t}\mathrm{d}t =$$

$$= (-(s\omega)^2 + igs\omega)b^s + \sum_{m=-M}^{M} k_{sm}(u)b^m, \tag{21}$$

где

$$k_{sm}(u) = \frac{1}{T}\int_0^T k(u)\mathrm{e}^{-is\omega t}\mathrm{e}^{im\omega t}\mathrm{d}t =$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T k(u)\mathrm{e}^{i(m-s)\omega t}\mathrm{d}t. \tag{22}$$

Матрица с элементами (22), где $s = -S, \ldots, S$, $m = -M, \ldots, M$, $S = M$, представляет собой матрицу Теплица. Для ее вычисления достаточно заполнить только первую строчку. Остальные заполняются автоматически с помощью специальной подпрограммы. Например, при использовании среды программирования MATLAB подпрограмма так и называется toeplitz.

Согласно формулам (19), (21) будем иметь:

$$\begin{cases} (-(s\omega)^2 + igs\omega)b^s + \sum\limits_{m=-M}^{M} k_{sm}(u)b^m + q_s(u) = 0; \quad (23) \\ q_s(u) = \dfrac{1}{T}\int\limits_0^T \mathrm{e}^{-is\omega t}F(u)\mathrm{d}t. \end{cases}$$

Эта система линейных алгебраических уравнений может быть использована для определения коэффициентов ряда (18), что позволяет сделать шаг в итерационной процедуре Ньютона—Канторовича (14), (15). Восстановим индекс n — номер приближения, и допустим, что известно периодическое движение массы на нелинейной пружине в n-м приближении $u_n(t)$. Введя индекс n в формулу (23), получим:

$$(-(s\omega)^2 + igs\omega)\, b_n^s + \sum_{m=-M}^{M} k_{sm}(u_n)\, b_n^m + q_s(u_n) = 0.$$

Из этой системы линейных алгебраических уравнений определим коэффициенты b_n^s, $s = -S, \ldots, S$.

Вместе с тем согласно выражениям (17) в n-м приближении известны

$$a_n^s = \frac{1}{T}\int\limits_0^T \mathrm{e}^{-is\omega t}u_n(t)\mathrm{d}t.$$

Но из формулы (15) следует, что

$$u_{n+1} = u_n + w_n$$

и значит

$$a_{n+1}^s = a_n^s + b_n^s. \qquad (24)$$

Теперь, зная коэффициенты a_{n+1}^s или, что то же, a_{n+1}^m, можем согласно выражениям (17) окончательно рассчитать замкнутую траекторию периодического движения в $(n + 1)$-м приближении:

$$u_{n+1}(t) = \sum_{m=-M}^{M} a_{n+1}^m \mathrm{e}^{im\omega t}.$$

Вместо алгоритма (14) может быть полезной модифицированная итерационная процедура:

$$F'(u_n)w_n + rF(u_n) = 0. \qquad (25)$$

При этом формула (24) заменится на формулу

$$a_{n+1}^s = a_n^s + rb_n^s.$$

Множитель r условно назовем длиной шага и примем $0 < r < 1$.

Можно показать, что уменьшение длины шага ослабляет условие сходимости модифицированного алгоритма (25), что расширяет возможности его применения.

Заметим также, что замена одного уравнения второго порядка (1) на два уравнения первого порядка (10) потребовалась для того, чтобы иметь возможность применить в начальной задаче метод Рунге—Кутта. В то же время сочетание итерационного метода Ньютона—Канторовича и проекционного метода Галеркина может быть применено непосредственно к одному уравнению второго порядка (1).

Все приведенные рассуждения относились к простейшему случаю колебаний одной массы на пружине. Однако аналогично могут быть рассмотрены также колебания механической системы с несколькими степенями свободы. В этом случае на место числовых значений ряда (17) встанут векторные неизвестные, порядок которых будет равен числу степеней свободы.

Между двумя изложенными методами есть принципиальная разница. В первом методе на каждом шаге метода Рунге—Кутта осуществляется шаг вдоль траектории движения от одной временной точки к последующей. Во втором же — проекционном методе, строится сразу последовательность замкнутых траекторий периодических движений. Хотя алгоритм проекционного метода более сложен, однако, как показывают расчеты реальных конструкций, вычислительный процесс здесь сходится несравненно быстрее, чем по первому методу. При замене же задачи о периодических колебаниях начальной задачей даже при положительном, но малом коэффициенте трения расчетное движение может очень медленно стремиться к предельному периодическому, а то и вовсе не удастся получить нужный результат за приемлемое время или же вычислительный процесс может вообще не сходиться. Заметим, что при удержании в разложении только одного слагаемого (для основной гармоники) изложенный проекционный метод аналогичен так называемому методу гармонического баланса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Приближенное** решение операторных уравнений / М. А. Красносельский, Г. М. Вайникко, П. П. Забрейко и др. М.: Наука, 1969. 455 с.

2. **Runge C.** Uber die numerische Ausflosung von Differentialgleichungen // Mathematische Annales. Bd. 46. 1895. P. 167—178.

3. **Фридман В. М.** Теория упругих колебаний. Уравнения и методы. СПб.: Наука, 2014. 254 с.

ve1219.fm Page 7 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 534.232:62-503

С. М. АФОНИН, канд. техн. наук (НИУ МИЭТ), e-mail: eduems@mail.ru

Кодовое управление многослойным пьезоактюатором нано- и микроперемещений

Получены механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при кодовом управлении. Определены статические и динамические характеристики многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном, поперечном и сдвиговом пьезоэффектах.

Ключевые слова: многослойный пьезоактюатор, нано- и микроперемещения, деформация, кодовое управление.

The mechanical and adjusting characteristics of a multilayer piezoactuator of nano- and microdisplacements with code control are obtained. The static and dynamic characteristics of multilayer piezoactuators of nano- and microdisplacements with longitudinal, transverse and shear piezoelectric effects are determined.

Keywords: multilayer piezoactuator, nano- and microdisplacements, deformation, code control.

Пьезоактюаторы нано- и микроперемещений применяются в оборудовании микроэлектроники, нанотехнологии, нанобиологии, астрономии для прецизионного совмещения, компенсации температурных, гравитационных деформаций, пространственного позиционированиия. Пьезоактюатор — пьезомеханическое устройство для приведения в действие механизмов и систем или управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта, преобразовывает электрические сигналы в механическое перемещение и силу [1—5].

Пьезоактюаторы нано- и микроперемещений имеют диапазон перемещения от нескольких нанометров до десятков микрометров, чувствительность до 1 нм/В, нагрузочную способность до 1000 Н [1, 3, 6]. Увеличение диапазона перемещения до десятков микрометров достигается использованием многослойного (составного, пакетного, блочного, секционного) пьезоактюатора [5, 7]. Конструктивное исполнение многослойного пьезоактюатора зависит от технологии изготовления. Многослойный пьезоактюатор выполняется в виде составного пьезопреобразователя из отдельных пьезопластин с их упругим поджатием, пакетного или блочного пьезопреобразователя из спеченных с применением серебряной пасты пьезопластин, составного пьезопреобразователя из пьезопакетов с упругим армированием, многослойного пьезопреобразователя, склеенного из пьезопластин, или многослойного пьезопреобразователя со слоями, нанесенными по толстопленочной или тонкопленочной технологиям, причем пьезоактюатор делится на секции для кодового управления.

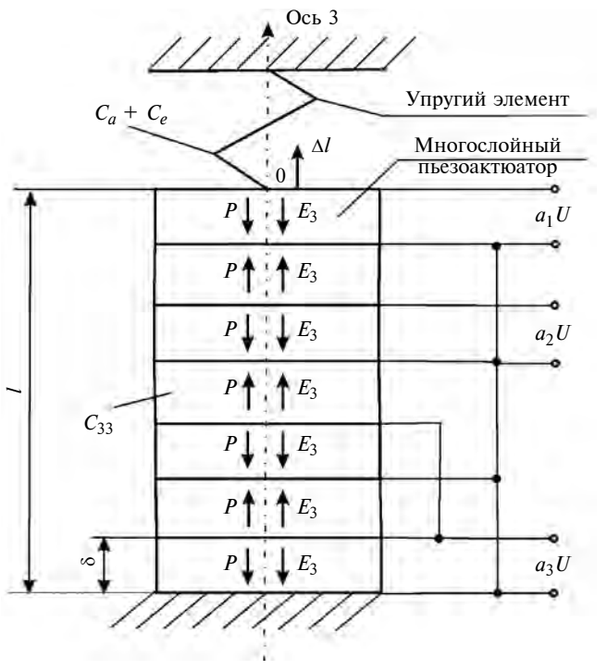
Для расчета систем управления деформацией многослойного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при кодовом управлении определяются механические и регулировочные характеристики пьезоактюаторов. Многослойный пьезоактюатор с кодовым управлением используется для электромеханического цифроаналогового преобразования. При кодовом управлении пьезослои в пьезоактюаторе соединены параллельно в каждой секции. Число пьезослоев в секции равно числу 2 в степени 0, 1, 2, 3, 4, ..., т. е. равно 1, 2, 4, 8, 16, ... и на каждую секцию через коммутатор подается соответствующее управляющее напряжение. Суммарная деформация многослойного пьезоактюатора с кодовым управлением складывается из деформаций отдельных секций пьезоактюатора при подаче на них напряжения и деформации многослойного пьезоактюатора при действии на него внешней силы. Для расчета прецизионных систем управления рассматривается влияние жесткости нагрузки, т. е. отношения упругой реакции нагрузки к деформации нагрузки, на механические и регулировочные характеристики многослойного пьезоактюатора при кодовом управлении.

Рассмотрим статические и динамические характеристики многослойных секционных пьезоактюаторов при кодовом управлении (рисунок). Электромеханическое цифроаналоговое преобразование [8] с использованием в качестве преобразователя пьезоэлектрического многослойного секционного пьезоактюатора при продольном, поперечном и сдвиговом пьезоэффекте обеспечивает нано- и микроперемещения, пропорциональные управляющему коду. Многослойный секционный пьезоактюатор с кодовым управлением секциями в системе управления применяется для прецизионного совмещения и юстировки. Многослойный секционный пьезоактюатор делится на N секций с числом n_k пьезопластин в k-й секции. Секции пьезоактюатора соединены механически последовательно, а электрически изолированы. Соответственно пьезопластины или пьезослои в секции соединены электрически параллельно, а механически последовательно.

В общем виде уравнение обратного пьезоэффекта [4, 5] имеет вид:

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m, \qquad (1)$$

ve1219.fm Page 8 Friday, November 15, 2019 2:31 PM



Кинематическая схема многослойного секционного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при кодовом управлении

где S_i — относительная деформация электромагнитоупругого актюатора по оси i; T_j — механическое напряжение в актюаторе по оси j; E_m — напряженность электрического поля в актюаторе по оси m; s_{ij}^E — упругая податливость при E = const; d_{mi} — пьезомодуль; i, j = 1, 2, ..., 6; m = 1, 2, 3.

Соответственно уравнение обратного пьезоэффекта [4, 5] при продольном пьезоэффекте пьезоактюатора имеет вид:

$$S_3 = d_{33}E_3 + s_{33}^E T_3,$$

где $S_3 = \xi/l$ — относительная деформация пьезоактюатора по оси 3; ξ — перемещение; $l = n\delta$ — длина многослойного пьезоактюатора; n — число пьезопластин; δ — толщина пьезопластины; d_{33} — продольный пьезомодуль; $E_3 = U/\delta$ — напряженность электрического поля в пьезоактюаторе по оси 3; U— напряжение на электродах пьезоактюатора; s_{33}^E — упругая податливость по оси 3 при E = const; $T_3 = -F/S_0$ — механическое напряжение в пьезоактюаторе по оси 3; S_0 — площадь сечения пьезоактюатора.

Уравнение обратного пьезоэффекта при поперечном пьезоэффекте пьезоактюатора принимает вид

$$S_1 = d_{31}E_3 + s_{11}^E T_1,$$

где S_1 — относительная деформация пьезоактюатора по оси 1; d_{31} — поперечный пьезомодуль; s_{11}^E — упругая податливость по оси 1 при E = const; T_1 — механическое напряжение по оси 1.

Уравнение обратного пьезоэффекта при сдвиговом пьезоэффекте пьезоактюатора записывается как

$$S_5 = d_{15}E_1 + s_{55}^E T_5,$$

где S_5 — относительная сдвиговая деформация пьезоактюатора; d_{15} — сдвиговый пьезомодуль; s_{55}^E — сдвиговая упругая податливость при E = const; T_5 — механическое напряжение сдвига.

В многослойном секционном пьезоактюаторе, состоящем из n пьезопластин, объединенных в N секций, при продольном пьезоэффекте (см. рисунок) имеем число пьезослоев или пьезопластин в k-й секции

$$n_k = 2^{k-1}, \tag{2}$$

длину k-й секции

$$l_k = 2^{k-1}\delta. \tag{3}$$

Здесь $k = 1, 2, ..., N$; $\delta = l_1$, где l_1 — длина 1-й секции пьезоактюатора; δ — толщина пьезослоя (пьезопластины). Из формул (2) и (3) получаем общую длину многослойного секционного пьезоактюатора (см. рисунок):

$$l = \sum_{k=1}^{N} l_k = (2^N - 1)\delta. \tag{4}$$

Следовательно, из выражений (1) и (4) получаем максимальное перемещение многослойного секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и подключении N секций в виде:

$$\Delta l_{\max_N} = d_{33}(2^N - 1)U = d_{33}nU, \tag{5}$$

где $n = 2^N - 1$ — число пьезопластин в многослойном секционном пьезоактюаторе.

В статике при передаче двоичного кода на вход коммутатора напряжения и подключении напряжения на секции пьезоактюатора с выходов коммутатора получаем соответствующее перемещение многослойного секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте:

$$\Delta l = \sum_{k=1}^{N} a_k \Delta l_k; \tag{6}$$

$$U_k = a_k U,$$

где $a_k \in \{0; 1\}$ — разрядные цифры двоичного кода; U_k — напряжение на k-й секции пьезоактюатора.

Из выражений (3) и (6) имеем:

$$\Delta l = \sum_{k=1}^{N} a_k d_{33} 2^{k-1} U = d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U. \tag{7}$$

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики многослойных пьезоактюаторов с кодовым управлением при продольном пьезоэффекте. Из формул (5) и (7) получаем выражение статической механической характеристики многослойного пьезоактюатора (см. рисунок) при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением:

$$\Delta l = d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U - s_{33}^E Fl/S_0 =$$

$$= d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U - F/C_{33}^E. \qquad (8)$$

$$C_{33}^E = s_0/(s_{33}^E l).$$

Следовательно, уравнение статической механической характеристики имеет вид:

$$\Delta l = \Delta l_{3\max}(1 - F/F_{3\max}).$$

Здесь:

$$\Delta l_{3\max} = d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U;$$

$$F_{3\max} = \frac{d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)US_0}{s_{33}^E l}$$

или

$$\Delta l_{3\max} = d_{33}n_s U; \quad F_{3\max} = \frac{d_{33}n_s US_0}{s_{33}^E l};$$

$$n_s = \sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1},$$

где n_s — число пьезослоев многослойного пьезоактюатора, подключенных к источнику напряжения.

Из выражения (8) определяем регулировочную характеристику многослойного секционного пьезоактюатора (см. рисунок) при упругой нагрузке:

$$\Delta l = \frac{d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{33}^E}} \qquad (9)$$

или

$$\Delta l = \frac{(d_{33}l_1/\delta)\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{33}^E}},$$

где $l_1 = \delta$ — длина 1-й секции пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте.

Регулировочная характеристика многослойного пьезоактюатора при продольном, поперечном или сдвиговом пьезоэффекте и упругой нагрузке имеет вид:

$$\Delta l = k_c U, \qquad (10)$$

где k_c — коэффициент передачи многослойного пьезоактюатора.

Соответственно коэффициент передачи многослойного пьезоактюатора при кодовом управлении составляет

$$k_c = \begin{cases} \dfrac{(d_{33}l_1/\delta)\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{33}^E}}; \\[2ex] \dfrac{(d_{31}l_1/\delta)\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{11}^E}}; \\[2ex] \dfrac{(d_{15}l_1/\delta)\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{55}^E}}. \end{cases}$$

Отсюда получаем коэффициент передачи многослойного пьезоактюатора при кодовом управлении в виде:

$$k_c = \frac{(d_{mi}l_1/\delta)\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{ij}^E}},$$

где l_1 — длина 1-й секции пьезоактюатора; d_{mi} — пьезомодуль; $C_{ij}^E = S_0/(s_{ij}^E l)$ — жесткость пьезоактюатора.

Соответственно коэффициент передачи многослойного пьезоактюатора при параллельном управлении имеет вид:

$$k_c = \frac{d_{mi}l/\delta}{1 + (C_a + C_e)/C_{ij}^E}.$$

Выражение для регулировочной характеристики многослойного секционного пьезоактюатора при упругой нагрузке получаем в виде:

$$\Delta l = \frac{(d_{mi}l_1/\delta)\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U}{1 + (C_a + C_e)/C_{ij}^E},$$

где $l_1 = \delta$, h, b — длина 1-й секции многослойного пьезоактюатора; δ — толщина пьезослоя; $d_{mi} = d_{33}$, d_{31}, d_{15} — пьезомодуль; $C_{ij}^E = C_{33}^E$, C_{11}^E, C_{55}^E — жесткость многослойного пьезоактюатора при продольном, поперечном и сдвиговом пьезоэффекте; C_a — жесткость армирующего элемента; C_e — жесткость нагрузки, $C_a + C_e$ — суммарная жесткость упругого элемента (см. рисунок).

При одном жестко закрепленном торце многослойного пьезоактюатора и продольном пьезоэффекте передаточная функция многослойного пьезоактюатора [8] при параллельном управлении и упругоинерционной нагрузке при $m \ll M$, где m — масса многослойного пьезоактюатора, записывается в виде:

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}n}{[1 + (C_a + C_e)/C_{33}^E](T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)}; \quad (11)$$

$$l = n\delta; \quad T_{33} = \sqrt{\frac{M}{C_a + C_e + C_{33}^E}};$$

$$\xi_{33} = \frac{\alpha l^2 C_{33}^E}{3c^E\sqrt{M(C_a + C_e + C_{33}^E)}},$$

где T_{33}, ξ_{33} — постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена при продольном пьезоэффекте многослойного пьезоактюатора.

Следовательно, из выражений (9) и (11) при кодовом управлении и продольном пьезоэффекте имеем передаточную функцию многослойного секционного пьезоактюатора для упругоинерционной нагрузки при $m \ll M$ в виде:

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{(d_{33}l_1/\delta)\sum\limits_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{\left(1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{33}^E}\right)(T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)} \quad (12)$$

или при $l_1 = \delta$ получаем:

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}\sum\limits_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{\left(1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{33}^E}\right)(T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)}.$$

С учетом выражений (10), (12) переходная характеристика многослойного пьезоактюатора при упругоинерционной нагрузке и электрическом сопротивлении $R \to 0$ записывается в обобщенном виде

$$\xi(t) = k_c U_0 h(t) = \xi_0 h(t),$$

где $h(t)$ — нормированная переходная характеристика многослойного пьезоактюатора; ξ_0 — установившаяся величина перемещения.

Установившаяся величина перемещения многослойного пьезоактюатора определяется в виде:

$$\xi_0 = \begin{cases} \dfrac{(d_{33}l_1/\delta)U_0\sum\limits_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{33}^E}}; \\[2ex] \dfrac{(d_{31}l_1/\delta)U_0\sum\limits_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{11}^E}}; \\[2ex] \dfrac{(d_{15}l_1/\delta)U_0\sum\limits_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{55}^E}}. \end{cases}$$

Отсюда получаем выражение для установившейся величины перемещения многослойного пьезоактюатора при кодовом управлении:

$$\xi_0 = \frac{(d_{mi}l_1/\delta)\left(\sum\limits_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U_0}{1 + \dfrac{C_a + C_e}{C_{ij}^E}}. \quad (13)$$

В выражении (13) параметры многослойного пьезоактюатора составляют: при продольном пьезоэффекте — $l_1 = \delta$, индексы $mi = 33$, $ij = 33$; при поперечном пьезоэффекте — $l_1 = h$, индексы $mi = 31$, $ij = 11$; при сдвиговом пьезоэффекте — $l_1 = b$, индексы $mi = 15$, $ij = 55$. Следовательно, нормированная переходная характеристика многослойного пьезоактюатора при кодовом управлении имеет вид:

$$h(t) = 1 - \frac{\mathbf{e}^{-\xi_{ij}t/T_{ij}}}{\sqrt{1 - \xi_{ij}^2}}\sin(\beta_{ij}t + \varphi_{ij}),$$

ve1219.fm Page 11 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 631.347

Д. А. СОЛОВЬЕВ, д-р техн. наук, Л. А. ЖУРАВЛЕВА, д-р техн. наук (Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова), e-mail: dfz@yandex.ru

Исследование влияния конструктивных параметров дождевателей на формирование дождя

Рассмотрено влияние конструктивных параметров дождевателей на параметры потока, определяющие качество полива. Исследовано взаимодействие потока воды с дефлекторами различных форм. Даны рекомендации по применению дефлекторов для разных условий дождевания.

Ключевые слова: орошение, дождевание, дождеватель, радиус, расход, дефлектор, скорость.

The influence of the design parameters of sprinklers on the flow parameters that determine the quality of irrigation is considered. The interaction of the water flow with deflectors of various shapes is studied. Recommendations on the use of deflectors for different irrigation conditions are given.

Keywords: irrigation, sprinkling, sprinkler, radius, flow rate, deflector, speed.

Рассматривая подачу воды через дождеватель, определяющий такие показатели, как радиус и качество полива, можно выделить два процесса взаимодействия потока воды и дождевателя (рис. 1):

1. Прохождение воды по корпусу и соплу дождевателя.

При этом входными параметрами являются характеристики потока воды из трубопровода, задающим параметром — конструкция самого дождевателя, основными выходными параметрами — скорость, диаметр струи, расход и напор воды.

2. Взаимодействие потока воды с дефлектором.

Входящими параметрами являются характеристики потока воды из сопла, задающими — конструкция дефлектора (форма, статичность/вращение, наличие канавок, их геометрия и расположение, угол выхода струи относительно горизонта), основными выходными параметрами — форма потока (пленка, отдельные струи, отдельные капли) и характеристики потока (скорость, направление, диаметр капель и др.).

Рассмотрим процессы взаимодействия потока воды и дождевателя в виде дефлекторной насадки. Корпус дождевателя представляет собой цилиндр. В зависимости от длины сопла, его формы и конфигурации входной кромки течение воды будет заметно различным (рис. 2).

Из данных таблицы видно, что оптимальную форму имеют конически сходящееся и коноидальное сопла. С точки зрения технологичности изготовления более рациональным является сопло в форме конуса.

Форма конически сходящихся сопел приближается к форме струи, практически устраняется сжатие и коэффициент скорости возрастает. Коэффициент расхода максимален, если угол конусности составляет 13°.

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 7)

где

$$\beta_{ij} = \frac{\sqrt{1-\xi_{ij}^2}}{T_{ij}}; \quad \varphi_{ij} = \mathrm{arctg}\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{ij}^2}}{\xi_{ij}}\right).$$

Заключение

Механические и регулировочные характеристики многослойных пьезоактюаторов при кодовом управлении позволяют рассчитывать статические и динамические режимы работы многослойных пьезоактюаторов с учетом внешней нагрузки и физических и геометрических параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Ленк А.** Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. М.: Мир, 1978. 286 с.

2. **Вардан В., Виной К., Джозе К.** ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.

3. **Миронов В. Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.

4. **Физическая акустика**. Т. 1. Часть А. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.

5. **Афонин С. М.** Решение матричных уравнений в задачах электроупругости для многослойных двигателей нано- и микроперемещений // Вестник машиностроения. 2011. № 9. С. 20—25.

6. **Афонин С. М.** Преобразование параметрических структурных схем пьезодвигателей нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте // Вестник машиностроения. 2016. № 3. С. 3—14.

7. **Afonin S. M.** A structural-parametric model of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement of mechatronic system // Chapter 8 in the book. Editors: Bartul Z., Trenor J. Advances in Nanotechnology. V. 19. New York: Nova Science Publisher. 2017. P. 259—284.

8. **Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Профессия, 2004. 752 с.

ve1219.fm Page 12 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

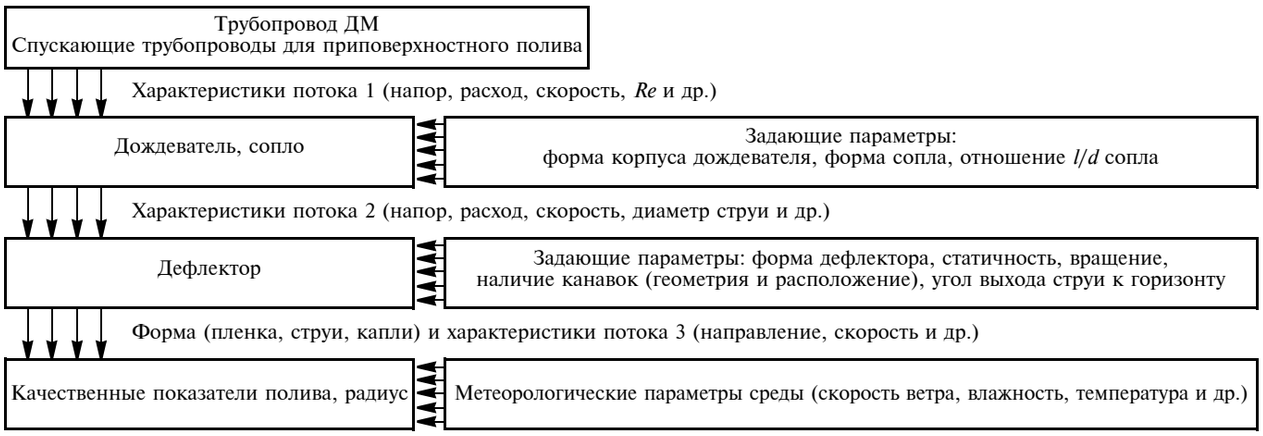


Рис. 1. Схема формирования характеристик дождя

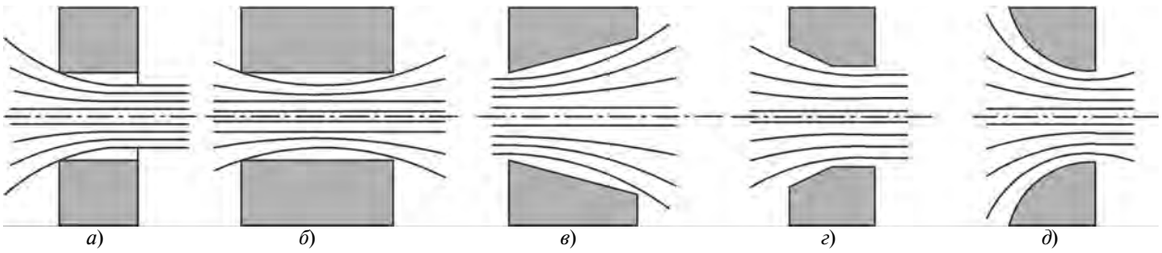


Рис. 2. Типы сопловых каналов:
а и *б* — короткий и длинный цилиндрические; *в* и *г* — расходящийся и сходящийся конические; *д* — с коноидальной входной кромкой

Рассмотрим движение воды, подаваемой под давлением из дождевателя. Механизм дробления потока, покинувшего сопло, зависит главным образом от формы вытекающей струи и ее скорости.

Начальная скорость струи, м/с, определяется как

$$W_{z0} = \varphi\sqrt{\frac{2(\mathrm{H} - p_0)}{\rho_{\text{в}}}},$$

где H — напор; p_0 — атмосферное давление; φ — коэффициент скорости истечения; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды.

Коэффициенты расхода μ, скорости φ и заполнения сечения ε для сопел различной формы[1]

Сопло	Коэффициент		
	φ	ε	μ
Короткое цилиндрическое	0,97	0,64	0,62
Длинное цилиндрическое	0,82	1,00	0,82
Конически расходящееся	0,45÷0,50	1,00	0,45÷0,50
Конически сходящееся	0,96	0,98	0,94
Коноидальное	0,98	1,00	0,98

[1] Пажи Д. Г., Галустов В. С. Распылители жидкостей. М.: Химия, 1979. 216 с.

Рабочим элементом дождевателя, осуществляющим передачу энергии, которая необходима для дробления попадающей на него воды, является дефлектор. Характеристики распыления (размер факела, дисперсность) определяются кинематическими параметрами дефлектора, в частности диаметром, формой и окружной скоростью. Распад струи или пленки воды происходит на сходе потока с дефлектора.

Жестко закрепленный статический дефлектор

Рассмотрим гладкий дефлектор. Пленка жидкости формируется на гладкой плоской или фигурной поверхности и скользит к периферийной кромке.

У поверхности дефлектора образуется пограничный слой, толщина $\delta_{\text{п.с}}$ которого увеличивается в направлении течения. Толщина $\delta_{\text{п.л}}$ пленки на некотором расстоянии $R_{\text{см}}$ становится равной толщине пограничного слоя. Радиус $R_{\text{см}}$ называют радиусом смыкания. Область течения можно условно разделить на две области[1]: потенциального течения — П и вязкого течения — В (рис. 3).

Для практических целей важно определить толщину пленки и среднюю скорость течения воды на

ve1219.fm Page 13 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

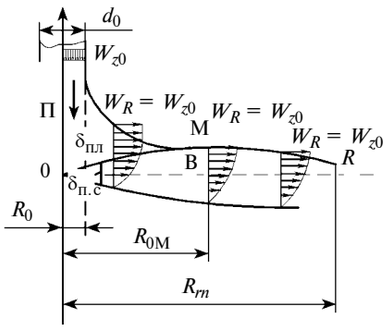


Рис. 3. Схема течения жидкости по поверхности дефлектора

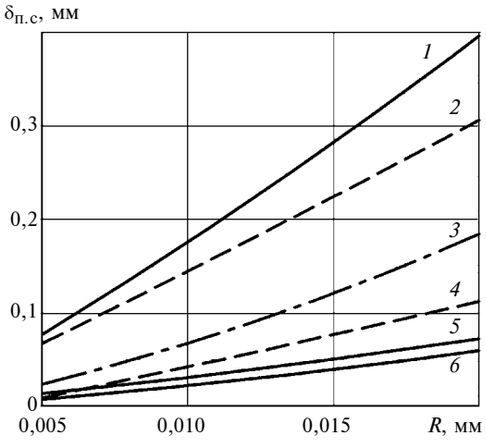


Рис. 4. Изменение толщины $\delta_{п.с}$ пограничного слоя вдоль радиуса *R* дефлектора:
1 — d_0 = 15 мм, $Q_Н$ = 3,5 л/с; *2* — d_0 = 12 мм, $Q_Н$ = 3,0 л/с; *3* — d_0 = 7 мм, $Q_Н$ = 2,5 л/с; *4* — d_0 = 5 мм, $Q_Н$ = 2,5 л/с; *5* — d_0 = 3 мм, $Q_Н$ = 1,5 л/с; *6* — d_0 = 3 мм, $Q_Н$ = 1 л/с

внешней кромке дефлектора, которые характеризуют дисперсность и гидродинамику сходящего потока.

Толщину пограничного слоя находим по выражению

$$\delta_{п.с} = 1{,}68\sqrt{\frac{\mu_в d_0}{\rho_в W_{z0}}},$$

где δ_0 — диаметр сопла дождевателя; $\mu_в$ и $\rho_в$ — соответственно вязкость и плотность воды.

Средняя скорость течения пленки убывает из-за увеличения толщины пограничного слоя и определяется выражением

$$W_{R_{ср}} = \frac{Q_Н W_{z0}}{Q_Н + 4{,}95 R\sqrt{W_{z0} R \mu_в/\rho_в}},$$

где $Q_Н$ — расход воды через сопло дождевателя.

Дождеватели с соплом диаметром 3÷15 мм и диаметром дефлектора 60 мм имеют толщину пленки на сходе с дефлектора в пределах 0,1÷5 мм (рис. 4).

Зависимость средней скорости $W_{R_{ср}}$ пленки на сходе с дефлектора от расхода $Q_Н$ представлена на рис. 5. С увеличением напора и расхода потока она возрастает.

Размер образующихся капель можно определить по эмпирическому уравнению

$$d_к = \frac{\mu_в^{1,18}}{W_{z0} d_0^{3,2} \rho_в^{1,18}},$$

где $d_к$ — средний объемно-поверхностный диаметр капли.

При увеличении скорости $W_{R_{ср}}$ средний объемно-поверхностный диаметр $d_к$ капли уменьшается (рис. 6).

Формой поверхности дефлектора задается угол вылета струи относительно горизонта. Для плоского статического дефлектора конической формы угол при вершине конуса дефлектора рекомендуется выбирать в пределах 110÷140°, угол подъема кромки дефлектора — 5÷15°.

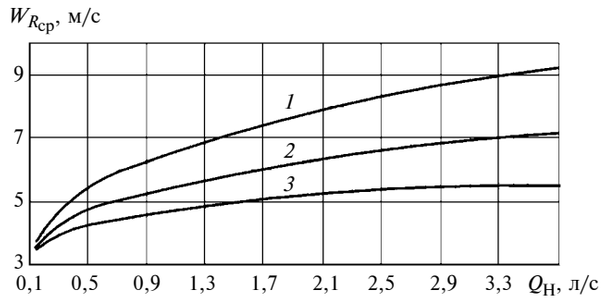


Рис. 5. Зависимости средней скорости $W_{R_{ср}}$ пленки на сходе с дефлектора от расхода $Q_Н$ для сопла диаметром 3 мм при напоре Н = 0,28 (*1*); 0,20 (*2*); 0,16 МПа (*3*)

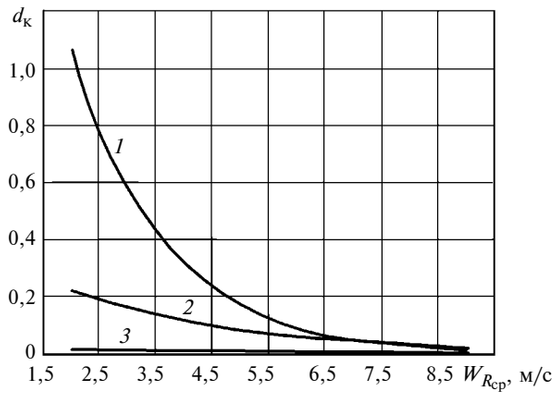


Рис. 6. Зависимости размера $d_к$ капель при Н = 0,18 МПа и диаметре сопла d_0 = 3 (*1*); 5 (*2*); 10 мм (*3*) от скорости $W_{R_{ср}}$

ve1219.fm Page 14 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Каскадные дождеватели

Увеличение производительности без изменения качества распыления может быть обеспечено применением каскадных дождевателей (рис. 7).

Принимая расход из сопла дождевателя за $Q_{\text{Н}}$, имеем:

$$Q_{\text{Н}} = \mu S_{\text{Н}} W_{z0},$$

где $S_{\text{Н}}$ — площадь сопла дождевателя.

Расход, обеспечивающий сходящий поток с первого дефлектора, определяется площадью кольца:

$$Q_1 = \mu\pi(r_{\text{Н}}^2 - r_1^2) W_{z0},$$

где $r_{\text{Н}}$ — радиус сопла дождевателя; r_1 — радиус отверстия первого дефлектора.

Расход:

для предпоследнего дефлектора

$$Q_{n-1} = \mu\pi(r_{n-1}^2 - r_n^2) W_{z0}.$$

для последнего дефлектора

$$Q_n = \pi\mu r_n^2 W_{z0}.$$

При обеспечении равенства расходов всех дефлекторов, т. е.

$$Q_1 = Q_2 = Q_{n-1} = Q_n = \pi\mu(r_{\text{Н}}^2 - r_1^2) W_{z0} =$$

$$= \pi\mu(r_1^2 - r_2^2) W_{z0} = \pi\mu(r_{n-1}^2 - r_n^2) W_{z0} = \pi\mu r_n^2 W_{z0},$$

имеем:

$$r_n = 0{,}71 r_{n-1}.$$

Таким образом, зная радиус сопла дождевателя, можно подобрать параметры отверстий в дефлекторе для обеспечения равенства между собой расходов всех дефлекторов.

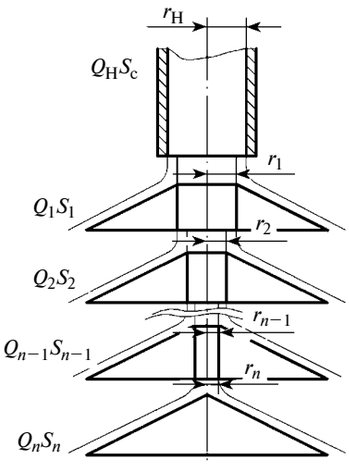


Рис. 7. Схема распределения расхода $Q_{\text{Н}}$ по дефлекторам каскадного дождевателя

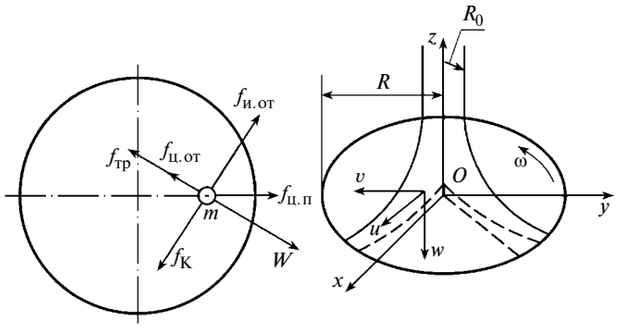


Рис. 8. Силы, действующие на элементарную массу:
$f_{\text{тр}}$ — сила трения относительного движения; $f_{\text{ц.от}}$ — центробежная сила относительного движения; $f_{\text{ц.п}}$ — центробежная сила переносного движения; $f_{\text{и.от}}$ — сила инерции относительного движения; $f_{\text{К}}$ — кориолисова сила инерции

Применение каскадных дождевателей позволяет разбивать поток на несколько факелов, обеспечивая равномерность орошения и достаточно щадящий полив при значительных расходах воды.

Вращающийся дефлектор с канавками

При условии постоянства массы рассматриваемого элемента воды его траектория в относительном движении имеет спиральную форму (рис. 8). Решение в размерных величинах после преобразований имеет вид:

$$\delta_{\text{п.с}} = 0{,}78 \frac{\mu_{\text{в}}^{0{,}33} Q_{\text{Н}}^{0{,}33}}{r^{0{,}66} \omega^{0{,}66}};$$

$$u = 0{,}78 \frac{r^{0{,}33} \omega^{1{,}33} Q_{\text{Н}}^{0{,}33}}{\mu_{\text{в}}^{0{,}33}} z - 0{,}5 \frac{r\omega^2}{\mu_{\text{в}}} z^2;$$

$$v = r\omega\left[1 - 0{,}32 \frac{Q_{\text{Н}}}{\mu_{\text{в}} r^2} z - 0{,}017 \frac{\omega^{1{,}33} Q_{\text{Н}}^{0{,}33}}{\mu_{\text{в}}^{0{,}33} r^{0{,}66}} z^3 + \right.$$

$$\left. + 0{,}08 \frac{\omega^2}{\mu_{\text{в}}^2} z^4\right];$$

$$w = 0{,}39 \frac{\omega^{1{,}33} Q_{\text{Н}}^{0{,}33}}{r^{0{,}66} \mu_{\text{в}}^{0{,}66}} z^2 - 0{,}166 \frac{\omega^2}{\mu_{\text{в}}} z^3,$$

где $\delta_{\text{п.с}}$ — толщина пленки жидкости; u, v, w — соответственно радиальная, окружная и осевая составляющие скорости течения.

На рис. 9 представлена зависимость медианного диаметра d капель от окружной скорости ω вращения диска при постоянном расходе воды. С увеличением окружной скорости размеры капель уменьшаются.

Поток воды попадает в криволинейные канавки, изогнутые таким образом, что создается момент

силы реакции вытекающей струи и дефлектор начинает вращаться вокруг оси.

Плотность орошения можно регулировать шириной и числом канавок, а размер орошаемой поверхности — высотой и углом раствора канавок (рис. 10).

При малых значениях напора поток воды сходит с дефлектора в виде пленки; дальнейшее повышение давления приводит к увеличению частоты вращения дефлектора, а распад потока на капли происходит непосредственно у края дефлектора дождевателя.

Траектория канавок на дефлекторе оказывает существенное влияние на формирование скорости и траектории полета капель воды.

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение частицы воды на дефлекторе, имеет вид:

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \frac{3\mu_в}{\rho_в}\left(\frac{2\pi r}{Q_Н}\right)^2\left(\frac{dr}{dt}\right)^3 - r\frac{d\theta}{dt} = 0;$$

$$\frac{d}{dt}\left(r\frac{d\theta}{dt}\right) - \frac{12\mu_в\pi^2 r^3}{\rho_в Q_Н^2}\left(\omega - \frac{d\theta}{dt}\right)\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = 0,$$

где $Q_Н$ — объемный расход воды; θ — угол поворота частицы; r — радиальная координата; ω — угловая скорость дефлектора.

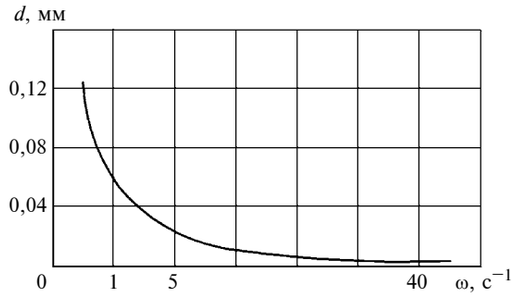


Рис. 9. Зависимость медианного диаметра *d* капель от угловой скорости ω дефлектора

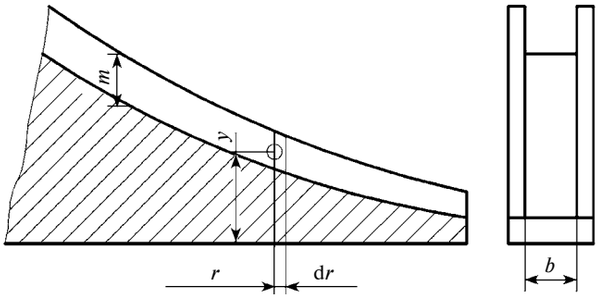


Рис. 10. Схема элемента дефлектора с канавками:
b — ширина канавки; *y* — вертикальная координата

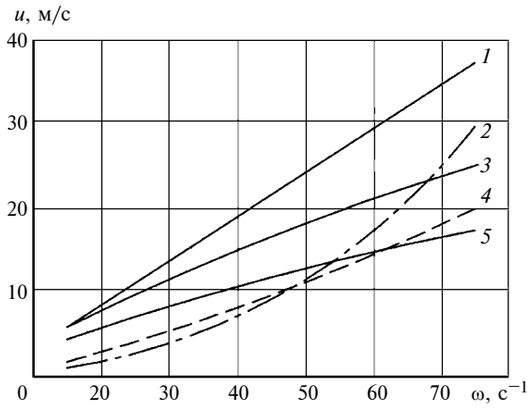


Рис. 11. Зависимости радиальной скорости *u* от угловой скорости ω дефлектора:
1 — $r_к$ = 0,005 мм, n = 14, D = 0,06 м, $Q_Н$ = 3,5 л/с; *2* — $r_к$ = 0,005 мм, n = 14, D = 0,1 м, $Q_Н$ = 0,5 л/с; *3* — $r_к$ = 0,0015 мм; n = 40, D = 0,09 м, $Q_Н$ = 0,5 л/с; *4* — $r_к$ = 0,0015 мм; n = 24, D = 0,08 м, $Q_Н$ = 0,5 л/с; *5* — $r_к$ = 0,005 мм, n = 14, D = 0,06 м, $Q_Н$ = 0,5 л/с

Радиальную скорость u воды при выходе с дефлектора с радиальными канавками рассчитываем по формулам:

$$u = 0{,}75\frac{\omega^{0,8}D^{0,4}}{В^{0,4}}\left(1 - \frac{0{,}9}{В^{0,92}\omega^{0,42}D^{1,43}}\right)^{0,4};$$

$В = 0{,}09 r_к^{0,35}\,\mu_в^{0,25}\,n^{0,8}\,Q_Н^{-0,8}$ для канавок в форме параболы;

$В = 0{,}096 b^{0,35}\mu_в^{0,25}\,n^{0,8}\,Q_Н^{-0,8}$ для прямоугольных канавок,

где В — параметр, зависящий от формы и числа n канавок дефлектора; D — диаметр дефлектора; $r_к$ — радиус канавок; b — ширина канавки на дефлекторе.

При увеличении скорости подачи воды из сопла, т. е. напора, увеличиваются скорость вылета капель дождя и соответственно радиус полива, а также уменьшается диаметр капель.

Анализ показал, что наибольшую скорость приобретает вода при выходе с вращающегося дефлектора, имеющего n канавок радиусом $r_к$ = 3÷5 мм при расходе Q = 2÷3,5 л/с и мелкие канавки радиусом 1,5÷2,5 мм, занимающие площадь всего дефлектора при малом расходе до 2 л/с (рис. 11).

Проведенные исследования показали, что при значительных расходах воды для повышения равномерности полива рационально применять каскадные дождеватели, для орошения в зонах с повышенным ветровым режимом — дождеватели со стационарными или вращающимися дефлекторами, имеющими крупные и средние канавки, для щадящего воздействия на почву и растения — дождеватели с дефлекторами, имеющими мелкие канавки.

ve1219.fm Page 16 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 624.011.001

А. К. ЮСУПОВ, д-р техн. наук, Х. М. МУСЕЛЕМОВ, канд. техн. наук, Т. О. УСТАРХАНОВ,
Ш. Г. ДЖАЛАЛОВ, канд. техн. наук (Дагестанский ГТУ, г. Махачкала), e-mail: hairulla213@mail.ru

Исследование металлодеревянной балки*

Предложена конструкция дощатоклееной балки, усиленной гибкими металлическими элементами. Для данной конструкции разработан алгоритм расчета и проведены экспериментальные исследования, подтвердившие полученные теоретически результаты.

Ключевые слова: дощатоклееная балка, перекладина, стойки, раскосы, гибкие элементы, несущая способность, алгоритм расчета, экспериментальные исследования.

A construction of a boarded glued beam reinforced with flexible metal elements is proposed. For this design, a calculation algorithm is developed and experimental studies are presented that confirm the theoretically obtained results.

Keywords: boarded glued beam, crossbeam, struts, braces, flexible elements, bearing capability, calculation algorithm, experimental studies.

Одними из наиболее распространенных несущих конструкций, применяемых в различных зданиях и сооружениях, являются балочные элементы. К ним относятся и деревянные балки, в том числе дощатоклееные.

В последнее время наблюдается увеличение потребности в деревянных балочных конструкциях, применяемых для перекрытия различных пролетов. Это приводит к увеличению расхода ценной древесины, что требует разработки других видов балочных конструкций, которые были бы просты в изготовлении и более экономичны [1, 2]. Один из вариантов таких конструкций — дощатоклееная балка, усиленная металлическими элементами, как показано на рис. 1, *а*. Основными рабочими элементами предложенной балки являются верхний жесткий деревянный элемент (перекладина), стойки и гибкие металлические элементы (раскосы и горизонтальный элемент).

Перекладина воспринимает усилия сжатия и изгиба. Здесь перекладина рассматривается как дощатоклееная балка сплошного поперечного сечения. Раскосы и горизонтальный элемент можно принять в виде профильных элементов (металлической арматуры и др.), работающих на растяжение. Стойка воспринимает усилия сжатия и ее можно проектировать в виде трубы квадратного сечения или двух швеллеров, двутавра, уголков и др.

Раскосы частично находятся в теле древесины и устанавливаются в заранее прорезанные в древесине пазы круглого или прямоугольного сечения, а арматура может быть вклеена (рис. 1, *в*) или просто установлена в паз и закреплена на концах (рис. 1, *б*). Отличительной особенностью предложенной металлодеревянной балки является то, что она изготовлена из двух материалов: древесины (основной материал) и металла (элемент усиления). Применение предложенного варианта балок позволит:

1) повысить несущую способность дощатоклееной балки;

2) уменьшить расход ценной древесины;

3) улучшить при необходимости эксплуатационные характеристики металлодеревянной балки натяжением металлических элементов в период эксплуатации.

При установке металлических элементов однопролетная дощатоклееная балка превращается в трехпролетную с упругоподатливыми средними опорами, что существенно уменьшает изгибающие моменты в сечениях перекладины и прогибы конструкции.

Данная статья посвящена разработке методики расчета предложенной балки и экспериментальной проверке результатов.

На рис. 1 и 2 приведены конструктивная и расчетные схемы шпренгельной балки с двумя упругоподатливыми опорами.

На рис. 2, *а* упругоподатливые опоры показаны в виде пружин. Для получения основной системы отбрасываем промежуточные опоры и заменяем их воздействие на балку силами X_1 и X_2 (рис. 2, *б*).

Дифференциальное уравнение поперечного изгиба балки, показанной на рис. 2, *б*, запишем в виде:

$$EJy^{\mathrm{IV}} = q(x) - X_1\delta(x - l_1) - X_2\delta(x - l_2), \qquad (1)$$

где EJ — жесткость балки при изгибе; y^{IV} — четвертая производная от прогиба балки; δ — функция Дирака, которую можно формально определить из соотношений:

$$y(x) = \begin{cases} 0, \text{ если } x \neq x_0, \\ \infty, \text{ если } x = x_0; \end{cases}$$

$$\int_{\Omega} \delta(x, x_0)\mathrm{d}x = \begin{cases} 1, \text{ если } x_0 \in \Omega, \\ 0, \text{ если } x_0 \notin \Omega. \end{cases}$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации (МК-6112.2018.8).

ve1219.fm Page 17 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

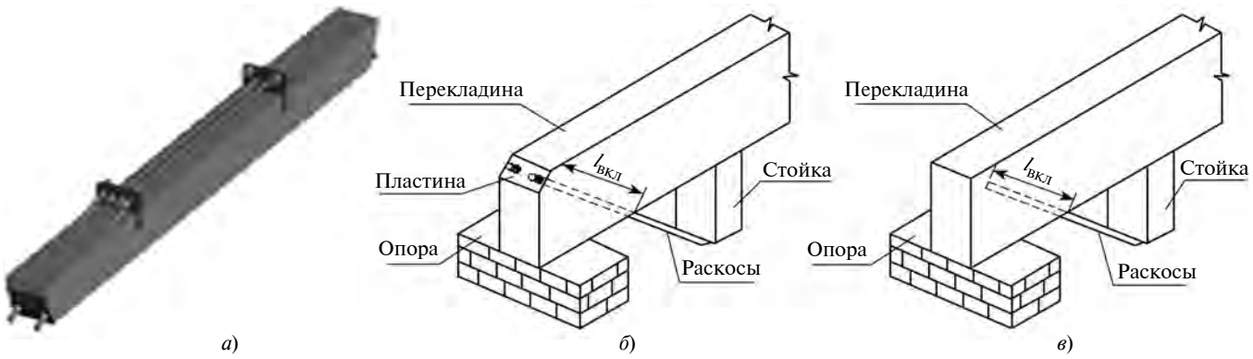


Рис. 1. Дощатоклееная балка, усиленная металлическими элементами

Дифференциальное уравнение (1) можно представить в интегральной форме:

$$y(x) = \int_0^1 G(x, \xi)[q(\xi) - X_1\delta(\xi - l_1) - X_2\delta(\xi - l_2)]\mathrm{d}\xi = \\ = y_0(x) - X_1 G(x, l_1) - X_2 G(x, l_2). \quad (2)$$

В выражении (2):

$$y(x) = \int_0^1 G(x, \xi)q(\xi)\mathrm{d}\xi;$$

$G(x, \xi) = [1 - \mathrm{e}(x - \xi)]\,G_1(x, \xi) + \mathrm{e}(x - \xi)\,G_2(x, \xi)$ — функция Грина [3, 4];

$\mathrm{e}(x - \xi)$ — единичная функция (функция Хевиса́йда).

Внутренние усилия в сечениях балки — изгибающие моменты M и поперечные силы Q, как известно, определяются дифференцированием функции прогибов

$$M = -EJy''(x). \quad (3)$$

Поперечные силы находим из выражения $Q = \mathrm{d}M/\mathrm{d}x$.

Используя формулу (3), определим изгибающие моменты в сечениях $l_x = \frac{l}{2}$, $l_x = \frac{l}{3}\left(\frac{2l}{3}\right)$ и $l_x = \frac{l}{6}\left(\frac{5l}{6}\right)$:

$$M\left(\frac{l}{2}\right) = -EJ\left\{-\frac{ql^2}{8EJ}\left[1 - \frac{88}{3(30 + 972k)}\right]\right\} = \\ = \frac{ql^2}{8}\left[1 - \frac{88}{3(30 - 972k)}\right]; \quad (4)$$

$$M\left(\frac{l}{3}, \frac{2l}{3}\right) = -EJ\left\{\frac{ql^2}{3EJ}\left[-\frac{1}{3} + \frac{11}{(30 + 972k)}\right]\right\} = \\ = -\frac{ql^2}{3}\left[-\frac{1}{3} + \frac{11}{(30 + 972k)}\right]; \quad (5)$$

$$M\left(\frac{l}{6}, \frac{5l}{6}\right) = -EJ\left\{-\frac{ql^2}{6EJ}\left[\frac{5}{12} - \frac{11}{(30 + 972k)}\right]\right\} = \\ = \frac{ql^2}{6}\left[\frac{5}{12} - \frac{11}{(30 + 972k)}\right], \quad (6)$$

где $k = \frac{EJ}{rl^3}$ — безразмерный коэффициент; r — коэффициент жесткости упругоподатливых опор:

$$r = \frac{h_{ст}E_р A_р}{\left(\frac{L}{3}\right)^2 + h_{ст}^2} \times \\ \times \left[\sqrt{(2h_{ст} + 1) + \left[\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h_{ст}^2\right]} - \sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h_{ст}^2}\right].$$

Распределение изгибающих моментов в балке показано на рис. 3. Прогиб металлодеревянной балки в сечении $x = l/2$ определяет выражение

$$y(l/2) = ql^4/EJ(5/384 - N_1 \cdot 23/648), \quad (7)$$

где

$$N_1 = ql\frac{\frac{11}{972}\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{486k^2}\right)}{\frac{49}{486^2k^2} - \left(1 - \frac{4}{243k}\right)^2}.$$

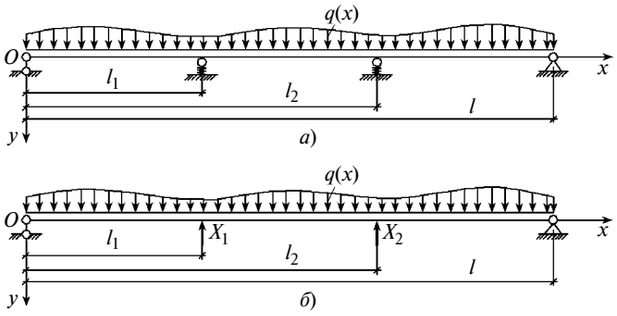


Рис. 2. Расчетная схема металлодеревянной балки:
а — задание системы; *б* — основная система

ve1219.fm Page 18 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

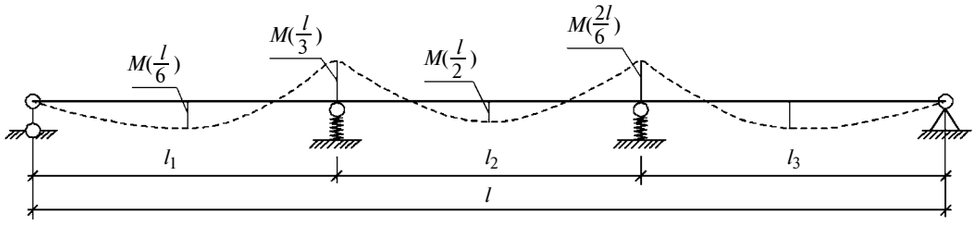


Рис. 3. Эпюра изгибающих моментов с учетом коэффициента жесткости

Для проверки правильности полученных зависимостей проведем экспериментальные и теоретические исследования дощатоклееной балки (с усилением и без усиления). В качестве примера рассмотрим дощатоклееные балки со следующими исходными данными: пролет $l = 120$ см; размеры поперечного сечения $b \times h = 6 \times 12$ см; порода древесины — сосна второго сорта. Расчетное сопротивление древесины сосны при изгибе $R_и = 140$ кгс/см^2 = 14 МПа [1]; расчетное сопротивление металла (элементов усиления) по пределу текучести $R = \frac{R^н}{\gamma_м} = 229{,}2$ МПа, где $R^н$ — нормативное сопротивление стали; $\gamma_м$ — коэффициент надежности по материалу.

Высоту $h_{ст}$ стойки примем равной 10 см. Тогда

$$r = \frac{h_{ст}E_р A_р}{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h_{ст}^2}\left[\sqrt{(2h_{ст}+1) + \left[\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h_{ст}^2\right]} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h_{ст}^2}\right] = 2953{,}067 \text{ кН/м};$$

$$k = \frac{EJ}{rl^3} = 0{,}01693.$$

На балку действует расчетная равномерно-распределенная нагрузка

$$q = 1 \div 10 \text{ кН/м}.$$

Подбираем сечения для растянутых элементов (наклонных и горизонтального) по формуле $\frac{F_{р1}}{A_{нетто}} \le \gamma R$ [5]. Необходимая площадь сечения раскоса $A_{нетто} = \frac{F_{р1}}{1{,}3\gamma R}$. Усилия в правом и левом раскосах при действии на балку равномерно-распределенной нагрузки составят:

$$F_{р1} = F_{р2} = N_1(N_2)/\sin\alpha = \frac{N_1/h_{ст}}{\sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h_{ст}^2}}.$$

Силу, действующую на перекладину (горизонтальный элемент), определим по формуле $F_п = F_{р1}\cos\alpha = F_{р1}\frac{l/3}{\sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h_{ст}^2}}$.

Примем, что наклонные и горизонтальные стержни состоят из двух стержней диаметром d.

Тогда с учетом приведенных формул и процента армирования деревянных балок получим диаметры стержней $d = 0{,}8$ см.

Расчет жесткого элемента (стойки) проведем по формуле

$$\frac{F_{ст}}{\varphi_x A_с} \le \gamma R,$$

где $F_{ст} = F_р\sin\alpha$; $A_с$ — необходимая площадь сечения стойки; φ_x — коэффициент продольного изгиба в плоскости.

Таблица 1

Теоретические изгибающие моменты в металлодеревянных (МД) и дощатоклееных (ДК) балках

Номер п/п	M (l/2), кН · м		Δ, %	M (l/3), кН · м		Δ, %	M (l/6), кН · м		Δ, %
	МД	ДК		МД	ДК		МД	ДК	
1	0,066	0,18	36,7	0,046	0,16	28,75	0,043	0,1	43,00
2	0,133	0,36	36,9	0,093	0,32	29,06	0,086	0,2	43,00
3	0,199	0,54	36,9	0,139	0,48	29,00	0,13	0,3	43,33
4	0,265	0,72	36,8	0,185	0,64	28,90	0,173	0,4	43,25
5	0,332	0,90	36,9	0,232	0,80	29,00	0,216	0,5	43,20
6	0,398	1,08	36,9	0,278	0,96	28,96	0,259	0,6	43,17
7	0,464	1,26	36,8	0,324	1,12	28,93	0,302	0,7	43,14
8	0,531	1,44	36,9	0,371	1,28	28,98	0,345	0,8	43,13
9	0,597	1,62	36,9	0,417	1,44	28,96	0,389	0,9	43,22
10	0,666	1,80	37,0	0,464	1,60	29,00	0,432	1,0	43,20

ve1219.fm Page 19 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Таблица 2

Теоретические и экспериментальные напряжения в середине металлодеревянных и дощатоклееных балок

Номер п/п	q, кН/м	Металлодеревянная балка			Дощатоклееная балка		
		σ_c, МПа		Δ, %	σ_c, МПа		Δ, %
		расчет	эксперимент		расчет	эксперимент	
1	1	0,627	0,7401	18,04	1,25	1,445	15,60
2	2	1,270	1,4950	17,72	2,50	2,845	13,80
3	3	1,936	2,2540	16,42	3,75	4,451	18,69
4	4	2,620	3,1440	20,00	5,00	5,895	17,90
5	5	3,325	3,9750	19,55	6,25	7,243	15,89
6	6	4,053	4,7360	16,87	7,50	9,068	20,91
7	7	4,804	5,8150	21,05	8,75	10,390	18,70
8	8	5,581	6,6890	19,85	10,00	11,780	17,84
9	9	6,385	7,5690	18,54	11,25	13,480	19,87
10	10	7,218	8,5710	18,75	12,50	14,480	15,87

Таблица 3

Теоретические и экспериментальные прогибы в середине металлодеревянных и дощатоклееных балок

Номер п/п	q, кН/м	Металлодеревянная балка			Дощатоклееная балка		
		u (l/2), м		Δ, %	u (l/2), м		Δ, %
		расчет	эксперимент		расчет	эксперимент	
1	0,8333	0,00077	0,00092	19,48	0,00217	0,0025	15,21
2	1,667	0,00154	0,00180	16,88	0,00434	0,0049	12,90
3	2,500	0,00231	0,00270	16,86	0,00650	0,0074	13,85
4	3,333	0,00308	0,00350	13,64	0,00870	0,0095	9,20
5	4,167	0,00385	0,00460	19,48	0,01090	0,0126	15,60
6	5,000	0,00462	0,00540	16,88	0,01300	0,0150	15,39
7	5,833	0,00539	0,00640	18,74	0,01520	0,0170	11,84
8	6,667	0,00615	0,00720	17,07	0,01740	0,0200	14,94
9	7,500	0,00692	0,00820	18,50	0,01950	0,0230	17,95
10	8,333	0,00770	0,00920	19,48	0,02170	0,0250	15,21

После подстановки в формулы (4)—(6) значений l и k определим изгибающие моменты в сечениях металлодеревянной балки:

при $x = l/6$:

$$M\left(\frac{l}{6}\right) = \frac{ql^2}{18}\left(\frac{5}{4} - \frac{11}{(10+324k)}\right) = 0{,}04317q \text{ кН}\cdot\text{м};$$

при $x = l/3$:

$$M\left(\frac{l}{3}\right) = \frac{ql^2}{9}\left(\frac{11}{(10+324k)} - 1\right) = -0{,}04634q \text{ кН}\cdot\text{м};$$

при $x = l/2$:

$$M\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{ql^2}{8}\left(1 - \frac{88}{3(30+972k)}\right) = 0{,}06634q \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Найдем напряжение в середине деревянной части металлодеревянной балки как растянуто-изгибаемого элемента [6]:

$$\sigma_c = \frac{N}{F_{нт}} + \frac{M_д R}{W_{нт} R} \le R_c m_b m_{сл}\gamma.$$

Здесь

$$N = F_п;\ F_{нт} = bh = 72 \text{ см}^2;$$

$$M_д = M(l/2)/\xi \text{ кН}\cdot\text{м}$$

$$[\xi = 1 - N/(\varphi_y R_c F_{бр}) = 1 - N/(0{,}616\cdot 140\cdot 72) = 0{,}873];$$

$$W_{нт} = bh^2/6 = 6\cdot 12^2/6 = 144 \text{ м}^3;$$

$$\lambda = l_р/i_y = 120/\sqrt{\frac{hb^3}{12bh}} = 69{,}28;$$

$$\varphi_y = 1 - 0{,}8(\lambda/100)^2 = 0{,}616;$$

N и $F_п$ — усилия сжатия в перекладине; $F_{нт}$ и $F_{бр}$ — площади сечения дощатоклееной балки нетто и брутто; m_b — коэффициент, учитывающий высоту сечения балки; $m_{сл}$ — коэффициент, учитывающий толщину слоя (доски); γ — коэффициент условий работы; $M_д = \dfrac{M_q}{\xi}$ — изгибающий момент с учетом дополнительного момента от продольной силы; φ_y — коэффициент продольного изгиба из плоскости; R_c — предел прочности древесины на сжатие; λ — гибкость балки; i_y — радиус инерции поперечного сечения дощатоклееной балки; $W_{нт}$ — момент сопротивления поперечного сечения дощатоклееной балки нетто.

Прогиб в металлодеревянной балке в сечении $x = l/2$ определим по формуле (7).

По приведенным выше формулам были определены изгибающие моменты M, прогибы u и напряжения σ_c в рассматриваемых балках. Результаты представлены в табл. 1—3.

Анализ результатов теоретических исследований изгибающих моментов показал, что в металлодеревянной балке с упругоподатливыми опорами изгибающие моменты на Δ = 28÷44 % меньше, чем в дощатоклееной балке (см. табл. 1).

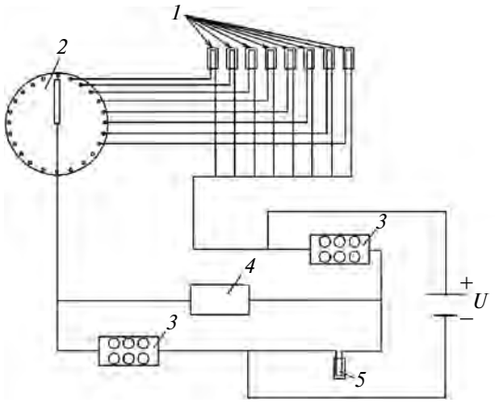
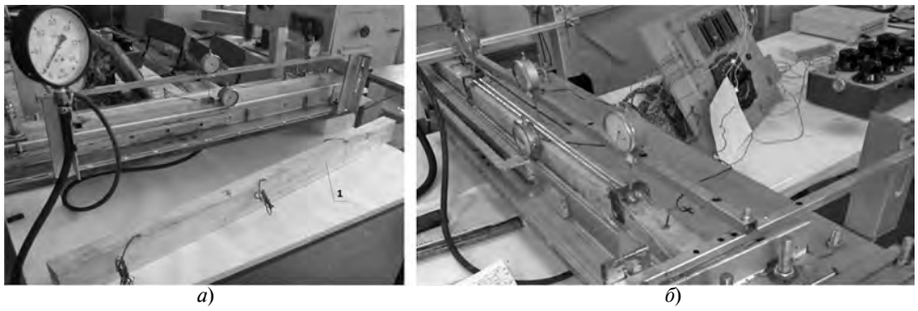


Рис. 4. Схема измерительного комплекса — мост Уитстона:

1 — измерительные тензорезисторы; *2* — барабанный переключатель; *3* — магазины сопротивлений; *4* — тензостанция ZET 017-T8; *5* — компенсационный тензорезистор

ve1219.fm Page 20 Friday, November 15, 2019 2:31 PM



а) *б*)

Рис. 5. Испытания образцов первой (*а*) и второй (*б*) серий на испытательном измерительном комплексе

Для проверки результатов теоретических исследований по определению несущей способности металлодеревянных балок провели экспериментальные испытания.

Экспериментальные исследования следует начинать с планирования испытаний [7], которое в нашей стране стало развиваться с 1960 г. под руководством В. В. Налимова [8].

Обработка многочисленных результатов экспериментов на дощатоклееных балках показала, что доверительный интервал $q = 0{,}5$.

Используя значения функции $L(q, k)$ для распределения Стьюдента, получим (при данном q и заданном α) число степеней свободы $k = 6$. Следовательно, выборка должна состоять не менее, чем из 7 образцов для каждой серии испытания. Для измерений напряжений и деформаций в дощатоклееных и металлодеревянных балках был использован испытательный измерительный комплекс (рис. 4 и 5).

Согласно правилам планирования эксперимента для получения достоверной информации необходимо знать число исследуемых факторов и методы их определения. В нашем случае основными определяющими факторами являются напряжения и деформации в исследуемых образцах, для определения которых использовали тензорезисторы и датчики часового типа. Тензорезисторы были вклеены в трех точках поверхности испытуемого образца. В этих же точках устанавливали датчики часового типа для определения перемещений. Для того чтобы определить напряжения и деформации с помощью тензорезисторов, необходимо знать коэффициент тензочувствительности, который находили с помощью станции ZET 017-T8 и градуированного устройства УСТ1 ВТ-12 (см. рис. 4).

Для испытания дощатоклееных и металлодеревянных балок была разработана и изготовлена экспериментальная установка (см. рис. 4 и 5), в которой равномерно-распределенная нагрузка, действующая на испытуемый образец, создавалась избыточным давлением воздуха, подаваемым в камеру компрессором, оборудованным манометром. Камера располагалась между металлическим листом и испытуемым образцом (балкой).

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены две серии образцов: первая — дощатоклееные балки с пролетами $l = 120$ см и размерами поперечных сечений $b \times h = 6 \times 12$ см; вторая — металлодеревянные балки с пролетами $l = 120$ см и размерами поперечных сечений $b \times h = 6 \times 12$ см и металлическими элементами, состоящими из четырех наклонных (по два слева и справа от податливых опор) и двух горизонтальных стержней диаметрами $d = 0{,}8$ см. Каждая серия образцов состояла из семи балок. Балки испытывались при шарнирном опирании концов. Результаты испытаний приведены в табл. 2 и 3.

Выводы

Сравнение теоретических результатов исследований с экспериментальными (см. табл. 2 и 3) показало, что разница между прогибами и напряжениями в балках с усилением и без усиления в среднем составляет 15 %. Это позволяет сделать вывод об эффективности металлодеревянных балок и правильности расчета. Исследования показали, что при проектировании металлодеревянных балок результаты расчета необходимо умножить на коэффициент 1,1÷1,15.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Калугин А. В.** Деревянные конструкции. М.: АСВ, 2008. 288 с.
2. **Щуко В. Ю., Рощина С. Ю.** Армированные деревянные конструкции в строительстве: учеб. пособие. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2002. 68 с.
3. **Устарханов О. М., Юсупов А. К., Муселемов Х. М.** Шпренгельные подкрановые балки. Махачкала: ДГТУ, 2016. 120 с.
4. **Юсупов А. К.** Методы прикладной математики в строительной механике. Т. 1. Махачкала: ДГТУ, 2008. 268 с.
5. **Металлические конструкции** / Под ред. Ю. И. Кудишина. М.: Академия, 2008. 688 с.
6. **СП 64.13330.2017.** Деревянные конструкции / АО "НИЦ "Строительство" — ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко М.: Стандартинформ, 2017. 92 с.
7. **Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 297 с.
8. **Налимов В. В.** Теория эксперимента. М.: Наука. 1971. 207 с.

ve1219.fm Page 21 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 66.081.6

С. И. ЛАЗАРЕВ, С. В. КОВАЛЕВ, доктора технических наук, О. А. КОВАЛЕВА, канд. техн. наук,
Д. Н. КОНОВАЛОВ (Тамбовский ГТУ), E-mail: sseedd@mail.ru

Разработка конструкции и расчет эффективной площади мембран и общего объема разделяемого раствора в электробаромембранном аппарате рулонного типа

Разработана конструкция электробаромембранного аппарата рулонного типа. Приведены расчеты эффективной общей рабочей площади мембран и объема разделения в единице объема аппарата в сравнении с аппаратом-прототипом.

Ключевые слова: электробаромембранный аппарат, расчет, мембрана, раствор, разделение.

The design of a roll-type electric baromembrane apparatus is developed. The calculations of the effective total working area of the membranes and the separation volume per unit volume of the apparatus in comparison with the prototype apparatus are presented.

Keywords: electric baromembrane apparatus, calculation, membrane, solution, separation.

В таких отраслях промышленности, как химическая, машиностроительная, фармацевтическая и др., актуальной является разработка перспективных и оптимизированных конструкций аппаратов для эффективного разделения растворов и сточных вод на компоненты. Выделение ценных компонентов в виде подкисленных и подщелоченных потоков позволяет в промышленных схемах разделения растворов снизить технологическую нагрузку на элементы очистных сооружений (фильтры, ионообменники, абсорбционные колонны и другую аппаратуру) при использовании их в качестве заменителей химических реагентов — кислот и щелочей. Анализ литературных данных показал, что перспективной и отработанной технологией, используемой в разных отраслях промышленности для разделения и выделения веществ на заключительных и финишных этапах очистки растворов, является применение баромембранных и электробаромембранных методов [1—7].

Цель расширения конструктивного исполнения баромембранных и электробаромембранных аппаратов — эффективное использование подобных методов разделения и очистки растворов, например, для выделения ценных компонентов (катионов и анионов) в виде потоков щелочей и оснований. Поэтому целью данной работы стала разработка конструкции и расчет эффективной площади разделения и объема раствора основных элементов электробаромембранного аппарата рулонного типа, схема разделения потоков в котором приведена на рис. 1. Данная схема разделения растворов позволяет в реальных процессах получать потоки веществ, диссоциированных на ионы определенного заряда, а в системах очистки создает предпосылки для получения подкисленных и подщелоченных растворов, которые легче перерабатывать и использовать вторично.

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников показал отсутствие работ по процессам разделения, в которых были бы представлены конструкции мембранных рулонных аппаратов, основанные на данных принципах разделения, за исключением работ [8—10].

Конструкция аппарата, представленная в работе [11], отличается от разработанного аппарата (рис. 2) тем, что имеет большое гидравлическое сопротивление в каналах для отвода ретентата и прианодного и прикатодного пермеатов, низкие производительность и качество разделения растворов, небольшие площади прикатодных и прианодных мембран для разделения растворов.

Созданный аппарат работает следующим образом. Исходный раствор под избыточным давлением подается через штуцер *1*. Далее проходит через сквозную проточку в центре крышки *2* под перфорированную трубку *3* с вертикальной перегородкой *4*, прокачивается в ней и через эллиптические проточки *5*, по периметру которых расположены

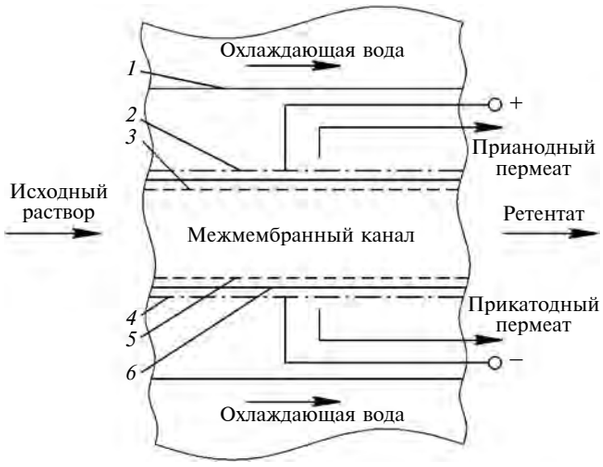


Рис. 1. Схема разделения на потоки прианодного и прикатодного пермеата и ретентата с охлаждением:

1 — коллектор; *2* — дренажная сетка-анод; *3* — прианодная мембрана; *4* — дренажная сетка-катод; *5* — прикатодная мембрана; *6* — подложка мембраны

ve1219.fm Page 22 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

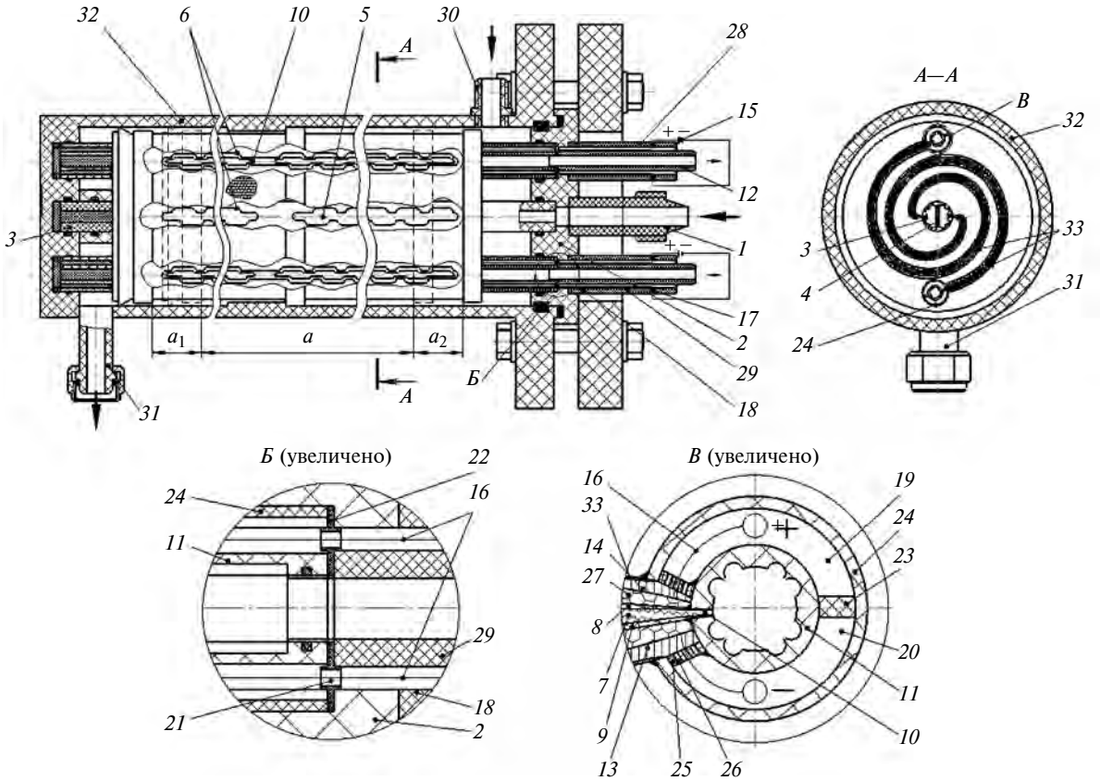


Рис. 2. Электробаромембранный аппарат рулонного типа

полуэллипсы *6*, поступает в пространство, где расположена сетка-турбулизатор *7*. По обе стороны от сетки-турбулизатора *7* расположены прианодные *8* и прикатодные *9* мембраны, образующие межмембранный канал, по которому циркулирует раствор, поступающий через эллиптические щели *10* в трубки *11*, и который далее удаляется через штуцер *12* для отвода ретентата.

В то же время на дренажные сетки, являющиеся катодом *13* и анодом *14*, устройство *15* включает подачу электрического тока по проводам *16*, соединенным через герметизирующие заливки *17* с внешними отводными трубками *18*, проходящие через коллекторы *19* и *20* для отвода соответственно прианодного и прикатодного пермеатов. Провода также проходят через отверстия *21* в фиксирующей прокладке *22*, затем между перегородкой *23*, внешней *24* и внутренней *11* трубками и перфорированными перегородками *25* через эллиптические отверстия *26*, и к аппарату подводится внешнее постоянное электрическое поле с заданной плотностью тока.

Раствор перемешивается с помощью сетки-турбулизатора *7*, установленной в зависимости от схемы подключения дренажных сеток в межмембранном канале около поверхностей прианодных *8* и прикатодных *9* мембран. В межмембранном канале растворенное вещество диссоциирует на ионы — анионы и катионы, которые под действием электрического тока и градиента давления проникают вместе с растворителем через поры прианодных *8* и прикатодных *9* мембран и подложки *27* мембран, попадая в пространства, где расположены дренажные сетки (анод *14* и катод *13*). Прианодный и прикатодный пермеаты самотеком удаляются через эллиптические отверстия *26* в перфорированной перегородке *25*, на которую уложены концы дренажных сеток (анод *14* и катод *13*), в коллекторы *19* и *20* соответственно и далее через отверстия *21* в фиксирующей прокладке *22* выводятся через штуцера *28* и *29* в виде кислот и оснований.

Одновременно с подачей исходного раствора через штуцера для ввода *30* и вывода *31* охлаждающей жидкостью заполняется коллектор, образуемый корпусом *32* аппарата, пленкой *33*, внешними трубками *24*, перфорированной трубкой *3* и крышкой *2*. Исходный раствор, проходя по межмембранному каналу с сеткой-турбулизатором *7*, очищается от катионов и анионов, попадает через эллиптические щели *10* в трубки *11* и штуцера *12* для отвода ретентата.

Методика включает расчет общей площади и площадей прикатодных и прианодных мембран, общего объема разделяемого раствора, а также объемов центральной и внутренних трубок, межмембранного канала аппарата, так как данные об объеме перекачиваемого раствора связаны с общим гидравлическим сопротивлением трубок, отводящих пермеат и ретентат.

ve1219.fm Page 23 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

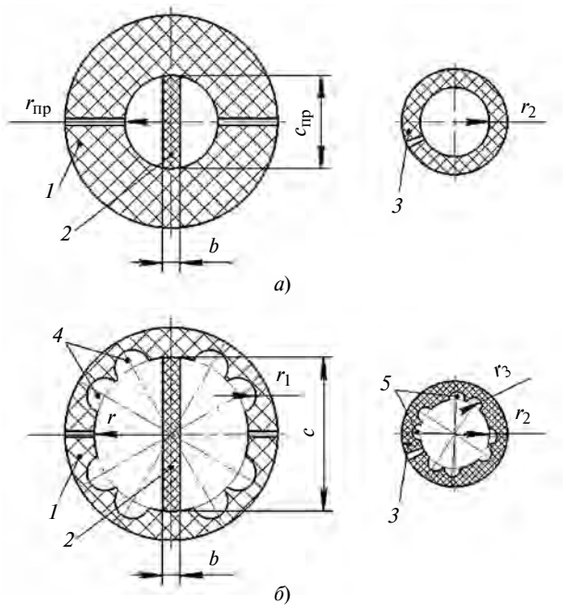


Рис. 3. Центральная и внутренняя отводные трубки аппарата-прототипа (*а*) и разработанного аппарата (*б*):

1 — перфорированная трубка; *2* — вертикальная перегородка; *3* — внутренняя трубка; *4* и *5* — полуокружности-проточки

Так как расчет основывается на конструктивных особенностях аппарата, на рис. 3, *а* и *б* показаны центральная и внутренняя отводные трубки в сечениях аппарата-прототипа и разработанного аппарата.

Общая площадь мембран разделения разработанного аппарата определяется по формуле

$$F_{об} = F_{об}^{-} + F_{об}^{+}.$$

Здесь $F_{об}^{-}$ и $F_{об}^{+}$ — общие площади прикатодных и прианодных мембран, м^2, которые рассчитываются по формулам:

$$F_{об}^{-} = n^{-} F_{м}^{-}; \quad (1)$$

$$F_{об}^{+} = n^{+} F_{м}^{+}, \quad (2)$$

где $n^{-} = 2$ и $n^{+} = 2$ — число прикатодных и прианодных мембран соответственно; $F_{м}^{-}$ и $F_{м}^{+}$ — площади одной прикатодной и одной прианодной мембраны соответственно, м^2.

Так как $F_{м}^{-} = F_{м}^{+} = F_{м}$, то расчет $F_{м}$ ведется при $n = n^{-} + n^{+}$.

Площадь одной мембраны аппарата-прототипа (см. рис. 2, штриховые линии), расположенной с одной стороны от сетки-турбулизатора *7* (см. рис. 1), определяется по формуле

$$F_{м.п} = al,$$

где $a = 0{,}4$ и $l = 3{,}75$ — ширина и длина полотна мембраны, м.

Площадь одной мембраны разработанного аппарата (см. рис. 2, сплошные линии), расположенной с одной стороны от сетки-турбулизатора *7*, определяется по формуле

$$F_{м} = (a + a_1 + a_2)l, \quad (3)$$

где $a_1 = a_2 = 0{,}025$ — увеличение ширины мембраны со стороны глухой и разъемной торцевых поверхностей, м.

При электробаромембранном разделении растворов в аппарате-прототипе [11] и разработанном нами аппарате гидравлическое сопротивление в единице объема аппарата связано с объемом обрабатываемой жидкости, свободно перекачиваемой через основные элементы мембранного устройства (межмембранный канал и трубки, отводящие пермеат и ретентат). В разработанной конструкции удалось получить оптимальное соотношение расчетной площади и снижение гидравлического сопротивления в трубках, отводящих пермеат и ретентат, и межмембранном канале, исходя из конструктивных соображений, поэтому геометрические параметры устройства выбрали близкими к параметрам промышленного аппарата.

Подставив формулу (3) в формулы (1) и (2), получим:

$$F_{об}^{-} = 2(a + a_1 + a_2)l;$$

$$F_{об}^{+} = 2(a + a_1 + a_2)l.$$

Общую площадь мембран в аппарате рассчитаем по формуле

$$F_{об} = 4(a + a_1 + a_2)l.$$

Общий объем раствора, перекачиваемого электробаромембранным аппаратом, рассчитаем по формуле

$$V_{об} = V_{ц.т} + mV_{м.к} + n_1 V_{в.т}, \quad (4)$$

где $V_{ц.т}$ и $V_{в.т}$ — объемы центральной и внутренней отводной трубок, м^3; $V_{м.к}$ — объем межмембранного канала, м^3; $n_1 = 2$ — число внутренних отводных трубок, шт.; $m = 2$ — число межмембранных каналов от центральной до внутренней отводной трубки.

Объем центральной трубки аппарата-прототипа [11] определяем по формуле

$$V_{ц.т} = l_1(\pi r_{п}^2 - bc_{п}), \quad (5)$$

где $l_1 = 0{,}5$ и $r_{п} = 0{,}0035$ — длина и внутренний радиус центральной трубки, м; $b = 0{,}0016$ и $c_{п} = 0{,}007$ — толщина и высота центральной перегородки, м.

Объем центральной трубки разработанного аппарата определяем по формуле

$$V_{ц.т} = l_1\left(\pi r^2 + n_2\frac{\pi r_1^2}{2} - bc\right), \quad (6)$$

где $r = 0{,}006$ и $r_1 = 0{,}0015$ — внутренний радиус и радиус полуокружностей центральной трубки, м;

ve1219.fm Page 24 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

$n_2 = 8$ — число полуокружностей; $c = 0{,}012$ — высота перегородки, м.

Объем межмембранного канала аппарата-прототипа [11] определяем по формуле

$$V_{\text{м.к}} = 2hal, \tag{7}$$

где $h = 0{,}00003$ — заданная толщина межмембранного канала аппарата-прототипа, м.

Так как толщина межмембранного канала в разработанном аппарате по сравнению с аппаратом-прототипом увеличена в 3 раза за счет уменьшения в 2 раза толщины дренажных сеток (анод *14* и катод *13*), объем канала определяем по формуле

$$V_{\text{м.к}} = 6h(a + a_1 + a_2)l. \tag{8}$$

Объем внутренней отводной трубки аппарата-прототипа [11] определяем по формуле

$$V_{\text{в.т.п}} = l_2 \pi r_2^2, \tag{9}$$

где $l_2 = 0{,}5$ и $r_2 = 0{,}004$ — соответственно длина и внутренний радиус трубки, м.

Объем внутренней отводной трубки разработанного аппарата определяем по формуле

$$V_{\text{в.т}} = l_2\left(\pi r_2^2 + n_3 \frac{\pi r_3^2}{2}\right), \tag{10}$$

где $n_3 = 8$ и $r_3 = 0{,}001$ м — число и радиус полуокружностей трубки.

Подставив значения, полученные по формулам (5), (7) и (9), в формулу (4), определяем общий объем аппарата-прототипа по формуле

$$V_{\text{об}} = l_1(\pi r_{\text{п}}^2 - bc_{\text{п}}) + 2hal + l_2 \pi r_2^2. \tag{11}$$

Подставив значения, полученные по формулам (6), (8) и (10), в формулу (4), определяем общий объем для разработанного аппарата по формуле

$$V_{\text{об}} = l_1\left(\pi r^2 + n_2 \frac{\pi r_1^2}{2} - bc\right) + 6h(a + a_1 + a_2)l + $$
$$+ n_1 l_2\left(\pi r_2^2 + n_3 \frac{\pi r_3^2}{2}\right). \tag{12}$$

Параметры	Аппарат-прототип [11]	Разработанный аппарат
$V_{\text{ц.т}}$, м^3	$1{,}36 \cdot 10^{-5}$	$8{,}03 \cdot 10^{-5}$
$V_{\text{м.к}}$, м^3	$9{,}0 \cdot 10^{-5}$	$30{,}4 \cdot 10^{-5}$
$V_{\text{в.т}}$, м^3	$2{,}51 \cdot 10^{-5}$	$2{,}55 \cdot 10^{-5}$
$V_{\text{об}}$, м^3	$12{,}87 \cdot 10^{-5}$	$40{,}98 \cdot 10^{-5}$
$F_{\text{об}}^{-}$, м^2	3,0	3,375
$F_{\text{об}}^{+}$, м^2	3,0	3,375
$F_{\text{об}}$, м^2	6,0	6,75

Результаты расчета при сравнении электробаромембранных аппаратов по формулам (11) и (12) по площади разделения и объему перекачиваемого раствора приведены в таблице.

Определим отношение меньшей площади к большей площади прикатодных и прианодных мембран:

$$x^{-,+} = \frac{F_{\text{п}}^{-,+}}{F_{\text{об}}^{-,+}} 100\ \%,$$

где $F_{\text{п}}^{-,+}$ и $F_{\text{об}}^{-,+}$ — общие площади прикатодных и прианодных мембран аппарата-прототипа [11] и разработанного аппарата соответственно, м^2.

Полученное отношение для прикатодных и прианодных мембран составило $x^- = x^+ = 88{,}9$ %.

Отношение меньшей общей площади мембран к большей площади рассчитаем по формуле

$$x = \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{об}}} 100\ \%,$$

где $F_{\text{п}}$ — общая рабочая площадь электробаромембранного аппарата-прототипа, м^2.

Увеличение общей площади и площадей прикатодных и прианодных мембран разработанного электробаромембранного аппарата рулонного типа по сравнению с аппаратом-прототипом [11] определяем по формулам

$$\Delta = 100\ \% - x\ \%;$$

$$\Delta^{-,+} = 100\ \% - x^{-,+}\ \%.$$

Таким образом, разработанная конструкция электробаромембранного аппарата и проведенный расчет эффективной площади разделения позволяют по сравнению с аппаратом-прототипом увеличить полезную общую рабочую площадь разделения в единице объема аппарата на 11,1 %, а общий объем разделяемого раствора на 31,4 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Структурные** и проницаемые характеристики ацетатцеллюлозных мембран при очистке промышленных стоков гальванических производств / О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев, К. В. Шестаков, А. А. Левин // Химическая технология. 2018. Т. 19. № 2. С. 74—80.
2. **Ковалев С. В.** Электробаромембранный аппарат трубчатого типа с дифференцированным выделением ионов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 4. С. 27—29.
3. **Ковалев С. В., Лазарев С. И., Эрлих А. В.** Экспериментальные исследования кинетических коэффициентов обратноосмотического разделения сульфатсодержащих растворов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2010. Т. 12. № 2. С. 128—132.
4. **Дытнерский Ю. И.** Обратный осмос и ультрафильтрация. М.: Химия, 1978. 352 с.
5. **Дытнерский Ю. И.** Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 1986. 272 с.

ve1219.fm Page 25 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 531:669.018.95

С. М. ВЕРЕЩАКА, д-р техн. наук, Д. А. ЖИГИЛИЙ, В. В. ДАНИЛЬЦЕВ, кандидаты технических наук
(Сумский ГУ, Украина, г. Сумы), e-mail: vereshakasergey@mail.ru

Определение прочности кольцевых образцов из стеклопластика на основе метода разрезного диска

Предложена методика определения пределов прочности многослойных композитных труб, армированных волокнами методом намотки. Каждый слой рассматривался как анизотропный материал с одной плоскостью упругой симметрии. Методом разрезного диска проведены испытания на растяжение кольцевых образцов пяти различных структур. На основе полиноминального критерия прочности определены предельные значения силы, растягивающей образец. Установлено, что код армирования многослойных композитных труб в значительной степени определяет их механические свойства.

Ключевые слова: предел прочности, метод разрезного диска, стеклопластиковые трубы.

A technique is proposed for 'determining the ultimate strengths of multilayer composite pipes reinforced with fibers by the winding method. Each layer was considered as an anisotropic material with one plane of elastic symmetry. The tensile tests of ring samples of five different structures were carried out using the split disk method. Based on the polynomial strength criterion, the ultimate values of the tensile strength of the specimen are determined. It is established, that the reinforcement code of multilayer composite pipes largely determines their mechanical properties.

Keywords: ultimate strength, split disc method, fiberglass pipes.

Из всего класса композиционных материалов устойчивую динамику внедрения в разные отрасли современной техники имеют анизотропные материалы, армированные непрерывными высокомодульными волокнами. В литературе приведен ряд типовых аналитических, вычислительных и экспериментальных методик, посвященных исследованиям механических характеристик композитов, изготовляемых методом намотки. Однако этот вопрос требует дополнительных научных исследований.

В данной статье приведены результаты изучения зависимости значений технических постоянных стеклопластиковых труб от коэффициента анизотропии композиционного материала. При исследованиях с использованием метода конечных элементов были протестированы экспериментальные данные, полученные методом разрезного диска на основе государственных и зарубежных стандартов.

В конце XX века на основании многослойной модели композитных труб был выполнен ряд аналитических исследований [1—6]. В работах [1—3] использованы решения краевых задач теории упругости анизотропного тела [7], полученные для неоднородного цилиндра.

Структуры композиционных материалов многих конструктивных элементов, изготовленных методом намотки, становятся все более сложными с точки зрения геометрии и возникающих при этом дополнительных нагрузок. Этот фактор обусловливает использование вычислительных методов при анализе напряженного состояния таких конструкций. Метод конечных элементов широко используется при оценке прочности армированных композитных конструкций, особенно, для определения в них полей напряжений и перемещений при различных условиях нагружения, а также для оценки предельного состояния конструкций [8—11].

В работах [12—16] опубликованы результаты экспериментальных исследований угле- и стеклопластиковых труб. Особый интерес представляют работы [12, 13], посвященные изучению напряженного состояния кольцевых образцов с целью оценки влияния натяжения нити и последовательности укладки слоев на окружные напряжения и жесткость композитной трубы. Кольцевые образцы имели различное объемное содержание армирующего материала и матрицы.

Таким образом, разработка и апробация методик определения механических характеристик анизотропных материалов на образцах, технология изготовления которых соответствует технологии

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 21)

6. **Москвин Л. Н., Царицина Л. Г.** Методы разделения и концентрирования в аналитической химии. Л.: Химия, 1991. 256 с.

7. **Кинетика** электробаромембранного разделения водных сульфатсодержащих растворов / С. И. Лазарев, А. С. Горбачев, Г. С. Кормильцин, О. А. Абоносимов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2008. Т. 10. № 1. С. 29—34.

8. **Совершенствование** конструкции и исследования электробаромембранного аппарата рулонного типа для разделения технологических растворов / С. И. Лазарев, С. В. Ковалев, Д. Н. Коновалов и др. // Вестник ТГТУ. 2018. Т. 24. № 4. С. 635—641.

9. **Пат. 2487746 Рос. Федерация:** МПК B01D 61/42. Электробаромембранный аппарат рулонного типа.

10. **Пат. 2522882 Рос. Федерация:** МПК B01D 61/42. Электробаромембранный аппарат рулонного типа.

11. **Пат. 2671723 Рос. Федерация:** МПК B01D 61/46, B01D 63/10. Электробаромембранный аппарат рулонного типа с низким гидравлическим сопротивлением.

ve1219.fm Page 26 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

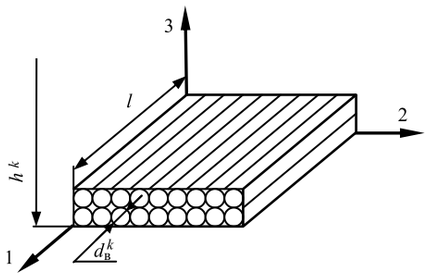


Рис. 1. Схема к расчету упругих характеристик слоя из ортотропного материала, армированного однонаправленными высокомодульными волокнами

изготовления реальных изделий, представляется актуальной задачей. Подобные образцы можно рассматривать как малогабаритные модели изделий.

Упругие постоянные. Согласно алгоритму, приведенному в работе [17], расчетные зависимости упругих характеристик ортотропного слоя, армированного высокомодульными волокнами, имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}
E_1^k &= \psi_1^k E_в + \frac{(1-\psi_1^k)(1+\psi_3^k)}{1-\psi_3^k} E_м;\\
E_2^k &= \frac{(1+\psi_3^k)}{(1-\psi_1^k)(1-\psi_3^k)(1-\nu_в^2)} E_м;\\
E_3^k &= \psi_3^k E_в + \frac{(1+\psi_3^k)}{(1-\psi_1^k)(1-\nu_в^2)} E_м;\\
G_{12}^k &= \frac{1+\psi_1^k}{(1-\psi_1^k)(1+\psi_3^k)} G_м;\\
G_{13}^k &= \frac{(1+\psi_1^k)(1+\psi_3^k)}{(1-\psi_1^k)(1-\psi_3^k)} G_м;\\
G_{23}^k &= \frac{1+\psi_3^k}{(1-\psi_3^k)(1-\psi_1^k)} G_м;\\
\nu_{12}^k &= \frac{\nu_в\psi_1 + (1-\psi_1^k)\nu_м}{(1+\psi_3^k)};\\
\nu_{13}^k &= \nu_в\psi_3^k + (1-\psi_3^k)\nu_м;\\
\nu_{23}^k &= \nu_в\psi_3^k + (1-\psi_3^k)\nu_м.
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Здесь и далее индекс "в" относится к арматуре, "м" — к связующему; ψ_1^k, ψ_3^k — относительное объемное содержание арматуры слоя в направлении осей 1 и 3 (рис. 1);

$$G_в = \frac{E_в}{2(1+\nu_в)}; \quad G_м = \frac{E_м}{2(1+\nu_м)}, \qquad (2)$$

где $E_в$, $E_м$ — модули упругости; $\nu_в$, $\nu_м$ — коэффициенты Пуассона.

Коэффициент армирования ψ_1^k, характеризующий относительное объемное содержание волокон, определяется выражением

$$\psi_1^k = \frac{\pi(d_в^k)^2}{4h^k} i_в^k, \qquad (3)$$

где h^k — толщина армированного слоя; $d_в^k$ — диаметр волокон; $i_в^k$ — частота армирования.

Величина ψ_3^k определяется по эмпирическим зависимостям, полученным на основе экспериментальных исследований, и, как правило, изменяется в интервале $\psi_3^k = (0{,}05 \div 0{,}15)\psi_1^k$. Геометрия однонаправленно армированного слоя показана на рис. 1. Все величины с индексом "k" относим к k-слою оболочки.

Соотношения упругости для ортотропного, однонаправленно армированного слоя в его осях симметрии 1, 2 (см. рис. 1) с учетом физико-технических постоянных (1)—(3) в матричной форме имеют вид:

$$\{\sigma^k\} = [A^k]\{\varepsilon^k\}; \quad \{\varepsilon^k\} = [B^k]\{\sigma^k\}, \qquad (4)$$

где $\sigma_k = [\sigma_{11}^k, \sigma_{22}^k, \sigma_{33}^k, \sigma_{23}^k, \sigma_{13}^k, \sigma_{12}^k]^T$ и $\varepsilon_k = [\varepsilon_{11}^k, \varepsilon_{22}^k, \varepsilon_{33}^k, \gamma_{23}^k, \gamma_{13}^k, \gamma_{12}^k]^T$ — матрицы-столбцы напряжений и деформаций слоя в направлении осей 1, 2, 3;

$$A^k = \begin{bmatrix} a_{11}^k & a_{12}^k & a_{13}^k & 0 & 0 & 0\\ a_{21}^k & a_{22}^k & a_{23}^k & 0 & 0 & 0\\ a_{31}^k & a_{32}^k & a_{33}^k & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & a_{44}^k & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55}^k & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66}^k \end{bmatrix}$$

и

$$B^k = \begin{bmatrix} b_{11}^k & b_{12}^k & b_{13}^k & 0 & 0 & 0\\ b_{21}^k & b_{22}^k & b_{23}^k & 0 & 0 & 0\\ b_{31}^k & b_{32}^k & b_{33}^k & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & b_{44}^k & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{55}^k & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{66}^k \end{bmatrix} —$$

матрицы жесткости и податливости ортотропного k-слоя.

Решая одновременно системы уравнений (4) относительно коэффициентов жесткости a_{ij}^k, можно составить зависимость

$$[A^k] = [B^k]^{-1}.$$

Как известно, коэффициенты податливости b_{ij}^k можно записать в виде:

$$\left.\begin{aligned} &b_{11}^k = \frac{1}{E_1^k};\ b_{12}^k = -\frac{\nu_{21}^k}{E_2^k};\ b_{13}^k = -\frac{\nu_{31}^k}{E_3^k};\ b_{21}^k = -\frac{\nu_{12}^k}{E_1^k};\\ &b_{22}^k = \frac{1}{E_2^k};\ b_{23}^k = -\frac{\nu_{32}^k}{E_3^k};\ b_{31}^k = -\frac{\nu_{13}^k}{E_1^k};\ b_{32}^k = -\frac{\nu_{23}^k}{E_2^k};\\ &b_{33}^k = \frac{1}{E_3^k};\ b_{44}^k = \frac{1}{G_{23}^k};\ b_{55}^k = \frac{1}{G_{13}^k};\ b_{66}^k = \frac{1}{G_{12}^k}. \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Пусть композит состоит из нескольких разно ориентированных слоев однонаправленного материала с заданными ортогональными системами координат: основной — $\alpha\beta z$ и локальными — $1^k 2^k z$ ($k = 1, 2, ..., n$, где n — число слоев).

Таким образом, в повернутых осях α, β, z армированный слой имеет свойства анизотропного материала с одной плоскостью упругой симметрии. Соотношения упругости такого слоя имеют вид:

$$\{\sigma_{\alpha\beta}^k\} = [A^{\varphi^k}]\{\varepsilon_{\alpha\beta}^k\}, \quad (6)$$

где $\{\sigma_{\alpha\beta}^k\} = \{\sigma_\alpha^k,\ \sigma_\beta^k,\ \sigma_z^k,\ \tau_{\beta z}^k,\ \tau_{\alpha z}^k,\ \tau_{\alpha\beta}^k\}^T$ и $\{\varepsilon_{\alpha\beta}^k\} = \{\varepsilon_\alpha^k,\ \varepsilon_\beta^k,\ \varepsilon_z^k,\ \gamma_{\beta z}^k,\ \gamma_{\alpha z}^k,\ \gamma_{\alpha\beta}^k\}^T$ — матрицы-столбцы напряжений и деформаций k-слоя в направлении осей α, β, z; φ^k — угол между осями общей системы координат и осями локальной системы координат k-слоя композита.

Систему уравнений (6) для дальнейших преобразований удобно записать в виде:

$$\{\sigma_\alpha^k\} = \left[A_\alpha^{\varphi^k}\right]\{\varepsilon_\alpha^k\};\quad \{\sigma_{\alpha 3}^k\} = \left[A_{\alpha 3}^{\varphi^k}\right]\{\varepsilon_{\alpha 3}^k\}, \quad (7)$$

где $\{\sigma_\alpha^k\} = \{\sigma_\alpha^k,\ \sigma_\beta^k,\ \sigma_z^k,\ \tau_{\alpha\beta}^k\}^T$; $\{\sigma_{\alpha 3}^k\} = \{\tau_{\beta z}^k,\ \tau_{\alpha z}^k\}^T$; $\{\varepsilon_\alpha^k\} = \{\varepsilon_\alpha^k,\ \varepsilon_\beta^k,\ \varepsilon_z^k,\ \gamma_{\alpha\beta}^k\}^T$; $\{\varepsilon_{\alpha 3}^k\} = \{\gamma_{\beta z}^k,\ \gamma_{\alpha z}^k\}^T$;

$$\left[A_\alpha^{\varphi^k}\right] = \begin{bmatrix} a_{11}^{\varphi^k} & a_{12}^{\varphi^k} & a_{13}^{\varphi^k} & a_{16}^{\varphi^k} \\ & a_{22}^{\varphi^k} & a_{23}^{\varphi^k} & a_{26}^{\varphi^k} \\ & \text{сим.} & a_{33}^{\varphi^k} & a_{36}^{\varphi^k} \\ & & & a_{66}^{\varphi^k} \end{bmatrix};\ \left[A_{\alpha 3}^{\varphi^k}\right] = \begin{bmatrix} a_{44}^{\varphi^k} & a_{45}^{\varphi^k} \\ \text{сим.} & a_{55}^{\varphi^k} \end{bmatrix};$$

$$a_{11}^{\varphi^k} = c^4 a_{11}^k + s^4 a_{22}^k + 2(a_{12}^k + 2a_{66}^k)s^2c^2 + s^4 a_{44}^k;$$

$$a_{22}^{\varphi^k} = s^4 a_{11}^k + c^4 a_{22}^k + 2(a_{12}^k + 2a_{66}^k)s^2c^2 + c^4 a_{44}^k;$$

$$a_{12}^{\varphi^k} = (a_{11}^k + a_{22}^k - 2a_{12}^k - 4a_{66}^k)s^2c^2 + a_{12}^k;$$

$$a_{16}^{\varphi^k} = [s^2 a_{22}^k - c^2 a_{11}^k + (a_{12}^k + 2a_{66}^k)(c^2 - s^2)]sc;$$

$$a_{26}^{\varphi^k} = [c^2 a_{22}^k - s^2 a_{11}^k - (a_{12}^k + 2a_{66}^k)(c^2 - s^2)]sc;$$

$$a_{33}^{\varphi^k} = a_{33}^k;\ a_{13}^{\varphi^k} = c^2 a_{13}^k + s^2 a_{23}^k;\ a_{23}^{\varphi^k} = s^2 a_{13}^k + c^2 a_{23}^k;$$

$$a_{44}^{\varphi^k} = c^2 a_{44}^k + s^2 a_{55}^k;\ a_{55}^{\varphi^k} = s^2 a_{44}^k + c^2 a_{55}^k;$$

$$a_{45}^{\varphi^k} = (a_{44}^k - a_{55}^k)sc;\ a_{36}^{\varphi^k} = (a_{23}^k - a_{13}^k)sc;$$

$$a_{66}^{\varphi^k} = (a_{11}^k + a_{22}^k - 2a_{12}^k + 4a_{66}^k)s^2c^2 + a_{66}^k.$$

Здесь и далее введены обозначения: $c = \cos\varphi$, $s = \sin\varphi$.

Когда композит является набором n разно ориентированных слоев однонаправленного материала, интегральные упругие характеристики рассмотренного пакета слоев находят из соотношений:

$$\{\sigma_\alpha\} = [A_\alpha]\{\varepsilon_\alpha\};\quad \{\sigma_{\alpha 3}\} = [A_{\alpha 3}]\{\varepsilon_{\alpha 3}\} \quad (8)$$

или

$$\begin{Bmatrix} \sigma_\alpha \\ \sigma_\beta \\ \sigma_z \\ \tau_{\alpha\beta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{16} \\ & a_{22} & a_{23} & a_{26} \\ & \text{сим.} & a_{33} & a_{36} \\ & & & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_\alpha \\ \varepsilon_\beta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{\alpha\beta} \end{Bmatrix};$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{\beta z} \\ \tau_{\alpha z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{44} & a_{45} \\ \text{сим.} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{\beta z} \\ \gamma_{\alpha z} \end{Bmatrix}.$$

Здесь $a_{ij} = \sum\limits_{k=1}^{n} a_{ij}^{\varphi^k}\bar{h}^k$, где $\bar{h}^k = h^k/h$ — относительная толщина k-слоя; $k = 1, 2, 3, ..., n$.

Упругие постоянные многослойного композита при растяжении можно получить, записав первую систему уравнений (8) в виде:

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = a_{11}\varepsilon_\alpha + a_{12}\varepsilon_\beta + a_{13}\varepsilon_z + a_{16}\gamma_{\alpha\beta}; \\ 0 = a_{12}\varepsilon_\alpha + a_{22}\varepsilon_\beta + a_{23}\varepsilon_z + a_{26}\gamma_{\alpha\beta}; \\ 0 = a_{13}\varepsilon_\alpha + a_{23}\varepsilon_\beta + a_{33}\varepsilon_z + a_{36}\gamma_{\alpha\beta}; \\ 0 = a_{16}\varepsilon_\alpha + a_{26}\varepsilon_\beta + a_{36}\varepsilon_z + a_{66}\gamma_{\alpha\beta}. \end{cases} \quad (9)$$

Подставив выражение $E_\alpha = \sigma_\alpha/\varepsilon_\alpha$ в первое уравнение системы уравнений (9), предварительно записав деформации ε_β, ε_z, $\gamma_{\alpha\beta}$ как функции парамет-

ра ε_α с помощью трех последних уравнений системы (9), нетрудно найти значения E_α:

$$E_\alpha = \frac{\det[A_\alpha]}{M_{11}}. \qquad (10)$$

В формуле (10) M_{11} — минор элемента a_{11} обобщенной матрицы $[A_\alpha]$. Аналогичным путем находят другие значения упругих постоянных:

модули упругости первого рода —

$$E_\beta = \frac{\det[A_\alpha]}{M_{22}}; \quad E_z = \frac{\det[A_\alpha]}{M_{33}};$$

модули сдвига —

$$G_{\alpha\beta} = \frac{\det[A_\alpha]}{M_{44}}; \quad G_{\alpha 3} = a_{55} - \frac{(a_{45})^2}{a_{44}};$$

$$G_{\beta 3} = a_{44} - \frac{(a_{45})^2}{a_{55}};$$

коэффициенты Пуассона —

$$\nu_{\alpha\beta} = \frac{M_{12}}{M_{11}}; \quad \nu_{\alpha z} = \frac{M_{13}}{M_{11}}; \quad \nu_{\beta z} = \frac{M_{23}}{M_{22}}.$$

Другие три значения коэффициентов Пуассона $\nu_{\beta\alpha}$, $\nu_{z\alpha}$, $\nu_{z\beta}$ находят с помощью соотношений:

$$\nu_{ij}E_j = \nu_{ji}E_i \quad (i, j = \alpha, \beta, z).$$

Матрица стеклопластика. В данной работе матрица стеклопластика — эпоксидный полимер со следующими параметрами упругости: $E_м = 3500$ МПа, $\nu_м = 0{,}35$. Связующая композиция включала 100 массовых частей (мас. ч.) эпоксидной смолы Epicot 828, предварительно прогретой до температуры 70 °С. В приготовленный объем эпоксидной смолы добавляли 2 мас. ч. ускорителя УП-606/2 и 80 мас. ч. отвердителя МТНРА (изготовлен в КНР). Предельная прочность указанной выше композиции составила: $\sigma_м^+ = 35$ МПа, $\tau_м^+ = 13$ МПа, $\nu_м = 0{,}35$ — на разрыв; $\sigma_м^- = 100$ МПа, $\tau_м^- = 37$ МПа, $\nu_м = 0{,}35$ — на сжатие. Такая композиция смолы горячего отверждения имеет низкую вязкость, обладает хорошими смачивающими свойствами и легко поддается обработке, а также имеет повышенную химическую стойкость, особенно к кислотам при температуре до 80 °С.

Армирующий материал. Модуль упругости $E_в$ и коэффициент Пуассона $\nu_в$ наматываемых лент, набранных из ровинга Е-600 (изготовлен в КНР), составляют $E_в = 68\,000$ МПа, $\nu_в = 0{,}2$. В каждом однонаправленном слое объем, занимаемый лентами, $V_в = 0{,}7$ от общего объема. Предел прочности ровинга Е-600 при растяжении принимается $\sigma_в^+ = 2000$ МПа. При определении предела прочности стеклопластиковых труб при сжатии принимается прочность Е-стекла при сжатии, $\sigma_в^- = 1000$ МПа. Предельное относительное удлинение ровинга на разрыв 3÷4 %.

Значения упругих характеристик многослойного материала стеклопластиковой трубы с пятью типами армирования, которые включают 21 однонаправленный слой, приведены в табл. 1. Здесь значения упругих характеристик даны в цилиндрической системе координат: E_z, E_θ, E_r — меридиональный, окружной и радиальный модули упругости первого рода соответственно; $G_{\theta z}$, G_{rz}, $G_{r\theta}$ — модули сдвига в плоскостях θz, rz, $r\theta$ соответственно; $\mu_{\theta z}$, μ_{rz}, $\mu_{r\theta}$ — коэффициенты Пуассона.

Таблица 1

Теоретические значения упругих характеристик стеклопластиковых труб

Типоразмер образца	Код армирования	$K = \frac{E_\theta}{E_z}$	E_j, МПа	G_{ij}, МПа	ν_{ij}	ν_{ji}
I	$[\pm 45°/\pm 30°/90°/45°/90°_2/\pm 45°/\overline{0°}]_s$	1,2	$E_z = 22\,460$ $E_\theta = 27\,320$ $E_r = 14\,060$	$G_{\theta z} = 15\,870$ $G_{rz} = 5785$ $G_{r\theta} = 6230$	$\nu_{z\theta} = 0{,}244$ $\nu_{zr} = 0{,}302$ $\nu_{\theta r} = 0{,}292$	$\nu_{\theta z} = 0{,}297$ $\nu_{zz} = 0{,}188$ $\nu_{r\theta} = 0{,}151$
II	$[\pm 45°/\pm 75°/\pm 45°/90°_2/\pm 45°/\overline{0°}]_s$	1,5	$E_z = 19\,620$ $E_\theta = 30\,060$ $E_r = 14\,010$	$G_{\theta z} = 15\,910$ $G_{rz} = 5531$ $G_{r\theta} = 6491$	$\nu_{z\theta} = 0{,}223$ $\nu_{zr} = 0{,}304$ $\nu_{\theta r} = 0{,}281$	$\nu_{\theta z} = 0{,}341$ $\nu_{zz} = 0{,}217$ $\nu_{r\theta} = 0{,}131$
III	$[90°_2/\pm 45°/90°_4/\pm 45°/\overline{0°}]_s$	2,0	$E_z = 18\,050$ $E_\theta = 36\,430$ $E_r = 13\,890$	$G_{\theta z} = 12\,580$ $G_{rz} = 5195$ $G_{r\theta} = 6827$	$\nu_{z\theta} = 0{,}148$ $\nu_{zr} = 0{,}327$ $\nu_{\theta r} = 0{,}307$	$\nu_{\theta z} = 0{,}299$ $\nu_{zz} = 0{,}252$ $\nu_{r\theta} = 0{,}117$
IV	$[90°_2/\pm 45°/90°_6/\overline{0°}]_s$	2,6	$E_z = 16\,230$ $E_\theta = 41\,760$ $E_r = 13\,890$	$G_{\theta z} = 9907$ $G_{rz} = 4898$ $G_{r\theta} = 7124$	$\nu_{z\theta} = 0{,}102$ $\nu_{zr} = 0{,}341$ $\nu_{\theta r} = 0{,}329$	$\nu_{\theta z} = 0{,}261$ $\nu_{zz} = 0{,}288$ $\nu_{r\theta} = 0{,}108$
V	$[90°_9/-45°/\overline{0°}]_s$	3,0	$E_z = 15\,190$ $E_\theta = 44\,350$ $E_r = 13\,630$	$G_{\theta z} = 8513$ $G_{rz} = 4746$ $G_{r\theta} = 7268$	$\nu_{z\theta} = 0{,}081$ $\nu_{zr} = 0{,}346$ $\nu_{\theta r} = 0{,}343$	$\nu_{\theta z} = 0{,}234$ $\nu_{zz} = 0{,}311$ $\nu_{r\theta} = 0{,}105$

Пределы прочности многослойного композита слоистой структуры. По аналогии с ранее приведенными выражениями (1)—(3) и принятыми гипотезами расчетные зависимости пределов прочности однонаправленно армированного высокомодульными волокнами слоя имеют вид:

$$\sigma_1^{\pm k} = \psi_1^k \sigma_{\text{в}}^{\pm} + \frac{(1-\psi_1^k)(1+\psi_3^k)}{1-\psi_3^k}\sigma_{\text{м}}^{\pm};$$

$$\sigma_2^{\pm k} = \frac{(1+\psi_3^k)}{(1-\psi_1^k)(1-\psi_3^k)(1-\nu_{\text{в}}^2)}\sigma_{\text{м}}^{\pm};$$

$$\sigma_3^{\pm k} = \psi_3^k \sigma_{\text{в}}^{\pm} + \frac{(1+\psi_3^k)}{(1-\psi_1^k)(1-\nu_{\text{в}}^2)}\sigma_{\text{м}}^{\pm};$$

$$\tau_{12}^{\pm k} = \frac{1+\psi_1^k}{(1-\psi_1^k)(1+\psi_3^k)}\tau_{\text{м}}^{\pm};$$

$$\tau_{23}^{\pm k} = \frac{1+\psi_3^k}{(1-\psi_3^k)(1-\psi_1^k)}\tau_{\text{м}}^{\pm};$$

$$\tau_{13}^{\pm k} = \frac{(1+\psi_1^k)(1+\psi_3^k)}{(1-\psi_1^k)(1-\psi_3^k)}\tau_{\text{м}}^{\pm},$$

где индекс "+" указывает на предел прочности при растяжении; индекс "−" — при сжатии.

Значения пределов прочности ортотропного однонаправленно армированного слоя в его осях симметрии 1, 2 (см. рис. 1) по аналогии с уравнениями (4) можно представить в матричной форме:

$$\{\sigma^{\pm k}\} = [R^{\pm k}]\{\theta^{\pm k}\}; \quad \{\theta^{\pm k}\} = [Q^{\pm k}]\{\sigma^{\pm k}\}, \qquad (11)$$

где $\sigma^{\pm k} = [\sigma_{11}^{\pm k}, \ \sigma_{22}^{\pm k}, \ \sigma_{33}^{\pm k}, \ \sigma_{23}^{\pm k}, \ \sigma_{13}^{\pm k}, \ \sigma_{12}^{\pm k}]^T$, $\theta^{\pm k} = [\theta_{11}^{\pm k}, \ \theta_{22}^{\pm k}, \ \theta_{33}^{\pm k}, \ \theta_{23}^{\pm k}, \ \theta_{13}^{\pm k}, \ \theta_{12}^{\pm k}]^T$ — матрицы-столбцы пределов прочности и функций влияния анизотропии слоя на пределы прочности в направлении осей декартовой системы координат;

$$[R^{\pm k}] = \begin{bmatrix} r_{11}^{\pm k} & r_{12}^{\pm k} & r_{13}^{\pm k} & 0 & 0 & 0 \\ r_{21}^{\pm k} & r_{22}^{\pm k} & r_{23}^{\pm k} & 0 & 0 & 0 \\ r_{31}^{\pm k} & r_{32}^{\pm k} & r_{33}^{\pm k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{44}^{\pm k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{55}^{\pm k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{66}^{\pm k} \end{bmatrix};$$

$$[Q^{\pm k}] = [R^{\pm k}]^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11}^{\pm k} & q_{12}^{\pm k} & q_{13}^{\pm k} & 0 & 0 & 0 \\ q_{21}^{\pm k} & q_{22}^{\pm k} & q_{23}^{\pm k} & 0 & 0 & 0 \\ q_{31}^{\pm k} & q_{32}^{\pm k} & q_{33}^{\pm k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44}^{\pm k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55}^{\pm k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{66}^{\pm k} \end{bmatrix} —$$

матрица прочности и матрица влияния анизотропии слоя при определении пределов прочности k-ортотропного слоя в направлении осей декартовой системы координат 123 соответственно.

Решая одновременно системы уравнений (11) относительно коэффициентов $r_{ij}^{\pm k}$ матрицы жесткости $[R^{\pm k}]$, можно составить следующие зависимости:

$$r_{11}^{\pm k} = \left[q_{22}^{\pm k} q_{33}^{\pm k} - (q_{23}^{\pm k})^2\right]\Delta^{-1};$$

$$r_{22}^{\pm k} = \left[q_{11}^{\pm k} q_{33}^{\pm k} - (q_{13}^{\pm k})^2\right]\Delta^{-1};$$

$$r_{33}^{\pm k} = \left[q_{11}^{\pm k} q_{22}^{\pm k} - (q_{12}^{\pm k})^2\right]\Delta^{-1};$$

$$r_{12}^{\pm k} = [q_{13}^{\pm k} q_{23}^{\pm k} - q_{12}^{\pm k} q_{33}^{\pm k}]\Delta^{-1};$$

$$r_{13}^{\pm k} = [q_{12}^{\pm k} q_{23}^{\pm k} - q_{22}^{\pm k} q_{13}^{\pm k}]\Delta^{-1};$$

$$r_{23}^{\pm k} = [q_{12}^{\pm k} q_{13}^{\pm k} - q_{11}^{\pm k} q_{23}^{\pm k}]\Delta^{-1};$$

$$\Delta = q_{11}^{\pm k} q_{22}^{\pm k} q_{33}^{\pm k} + q_{12}^{\pm k} q_{23}^{\pm k} q_{31}^{\pm k} + q_{21}^{\pm k} q_{32}^{\pm k} q_{13}^{\pm k} - q_{13}^{\pm k} q_{22}^{\pm k} q_{31}^{\pm k} - q_{21}^{\pm k} q_{12}^{\pm k} q_{33}^{\pm k} - q_{11}^{\pm k} q_{32}^{\pm k} q_{23}^{\pm k};$$

$$r_{44}^{\pm k} = \frac{1}{q_{44}^{\pm k}}; \quad r_{55}^{\pm k} = \frac{1}{q_{55}^{\pm k}}; \quad r_{66}^{\pm k} = \frac{1}{q_{66}^{\pm k}}.$$

Проводя аналогию с выражениями (5) и исходя из физического смысла соотношений (11), коэффициенты $q_{ij}^{\pm k}$ запишем в виде:

$$q_{11}^{\pm k} = \frac{1}{\sigma_1^{\pm k}}; \ q_{12}^{\pm k} = -\frac{\nu_{21}^k}{\sigma_2^{\pm k}}; \ q_{13}^{\pm k} = -\frac{\nu_{31}^k}{\sigma_3^{\pm k}}; \ q_{21}^{\pm k} = -\frac{\nu_{12}^k}{\sigma_1^{\pm k}};$$

$$q_{22}^{\pm k} = \frac{1}{\sigma_2^{\pm k}}; \ q_{23}^{\pm k} = -\frac{\nu_{32}^k}{\sigma_3^{\pm k}}; \ q_{31}^{\pm k} = -\frac{\nu_{13}^k}{\sigma_1^{\pm k}}; \ q_{32}^{\pm k} = -\frac{\nu_{23}^k}{\sigma_2^{\pm k}};$$

$$q_{33}^{\pm k} = \frac{1}{\sigma_3^{\pm k}}; \ q_{44}^{\pm k} = \frac{1}{\tau_{23}^{\pm k}}; \ q_{55}^{\pm k} = \frac{1}{\tau_{13}^{\pm k}}; \ q_{66}^{\pm k} = \frac{1}{\tau_{12}^{\pm k}}.$$

Используя алгоритм (6)—(10), несложно получить интегральные характеристики пределов прочности заданного пакета слоев.

Пределы прочности многослойного материала пяти типов армирования стеклопластиковых труб, которые включают 21 однонаправленно армированный слой с заданными кодами армирования, приведены в табл. 2, где все значения представлены в цилиндрической системе координат: σ_z, σ_θ и σ_r — меридиональные, окружные и радиальные нормальные напряжения; $\tau_{\theta z}$, τ_{rz}, $\tau_{r\theta}$ — касательные напряжения соответственно в плоскости θz, rz, $r\theta$.

Критерий прочности. Исключая единичные работы, полиноминальные критерии прочности содержат только компоненты плоского напряженного состояния. При этом не учитываются напряжения и деформации поперечного сдвига σ_{i3}^-, σ_{i3}^+ (i = 1,2) и трансверсального отрыва или сжатия σ_{33}^+, σ_{33}^-. Стеклопластиковые трубы представляют собой набор анизотропных слоев с одной плоскостью упругой симметрии. Поэтому полиноминальный критерий прочности, представленный в работе [18], предлагается записать в следующем виде:

$$R_{11}\sigma_{11} + R_{22}\sigma_{22} + R_{33}\sigma_{33} + R_{1111}\sigma_{11}^2 + R_{2222}\sigma_{22}^2 + R_{3333}\sigma_{33}^2 + 4R_{1212}\sigma_{12}^2 + 4R_{1313}\sigma_{13}^2 + 4R_{2323}\sigma_{23}^2 + 2R_{1122}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2R_{1133}\sigma_{11}\sigma_{33} + 2R_{2233}\sigma_{22}\sigma_{33} = 1. \quad (12)$$

Коэффициенты уравнения (12) определяются с использованием установленных предельных характеристик прочности σ_{ij}^+, σ_{ij}^- (i, j = 1,2). Индекс "+" означает предельное напряжение при растяжении, индекс "−" при сжатии. Для компонент тензоров поверхности прочности (12) в работе [18] предложены следующие соотношения:

$$R_{11} = \frac{\sigma_{11}^- - \sigma_{11}^+}{\sigma_{11}^-\sigma_{11}^+}; \quad R_{22} = \frac{\sigma_{22}^- - \sigma_{22}^+}{\sigma_{22}^-\sigma_{22}^+};$$

$$R_{33} = \frac{\sigma_{33}^- - \sigma_{33}^+}{\sigma_{33}^-\sigma_{33}^+}; \quad R_{12} = \frac{\sigma_{12}^- - \sigma_{12}^+}{\sigma_{12}^-\sigma_{12}^+};$$

$$R_{1111} = \frac{1}{\sigma_{11}^-\sigma_{11}^+}; \quad R_{2222} = \frac{1}{\sigma_{22}^-\sigma_{22}^+}; \quad 4R_{1212} = \frac{1}{\sigma_{12}^-\sigma_{12}^+};$$

$$2R_{1122} = \frac{R_{11} - R_{22}}{\sigma_{12}^-} + R_{1111} + R_{2222} + \frac{1}{(\sigma_{12}^-)^2};$$

$$R_{3333} = \frac{1}{\sigma_{33}^-\sigma_{33}^+}; \quad 4R_{1313} = \frac{1}{\sigma_{13}^-\sigma_{13}^+};$$

Таблица 2

Теоретические значения пределов прочности стеклопластиковых труб

Типоразмер образцов	Код армирования	$K = \frac{E_\theta}{E_z}$	σ_j^+, МПа	τ_{ij}^+, МПа	σ_j^-, МПа	τ_{ij}^-, МПа
I	$[\pm45°/\pm30°/90°/45°/90°_2/\pm45°/\overline{0°}]_s$	1,2	$\sigma_z^+ = 426$ $\sigma_\theta^+ = 585$ $\sigma_r^+ = 172$	$\tau_{\theta z}^+ = 300$ $\tau_{rz}^+ = 58$ $\tau_{r\theta}^+ = 62$	$\sigma_z^- = 495$ $\sigma_\theta^- = 548$ $\sigma_r^- = 374$	$\tau_{\theta z}^- = 353$ $\tau_{rz}^- = 165$ $\tau_{r\theta}^- = 178$
II	$[\pm45°/\pm75°/\pm45°/90°_2/\pm45°/\overline{0°}]_s$	1,5	$\sigma_z^+ = 330$ $\sigma_\theta^+ = 667$ $\sigma_r^+ = 171$	$\tau_{\theta z}^+ = 285$ $\tau_{rz}^+ = 55$ $\tau_{r\theta}^+ = 65$	$\sigma_z^- = 464$ $\sigma_\theta^- = 578$ $\sigma_r^- = 374$	$\tau_{\theta z}^- = 333$ $\tau_{rz}^- = 158$ $\tau_{r\theta}^- = 185$
III	$[90°_2/\pm45°/90°_4/\pm45°/\overline{0°}]_s$	2,0	$\sigma_z^+ = 299$ $\sigma_\theta^+ = 932$ $\sigma_r^+ = 169$	$\tau_{\theta z}^+ = 214$ $\tau_{rz}^+ = 52$ $\tau_{r\theta}^+ = 68$	$\sigma_z^- = 433$ $\sigma_\theta^- = 628$ $\sigma_r^- = 373$	$\tau_{\theta z}^- = 297$ $\tau_{rz}^- = 148$ $\tau_{r\theta}^- = 195$
IV	$[90°_2/\pm45°/90°_6/\overline{0°}]_s$	2,6	$\sigma_z^+ = 247$ $\sigma_\theta^+ = 1147$ $\sigma_r^+ = 166$	$\tau_{\theta z}^+ = 143$ $\tau_{rz}^+ = 49$ $\tau_{r\theta}^+ = 71$	$\sigma_z^- = 405$ $\sigma_\theta^- = 671$ $\sigma_r^- = 371$	$\tau_{\theta z}^- = 252$ $\tau_{rz}^- = 140$ $\tau_{r\theta}^- = 204$
V	$[90°_9/-45°/\overline{0°}]_s$	3,0	$\sigma_z^+ = 210$ $\sigma_\theta^+ = 1246$ $\sigma_r^+ = 163$	$\tau_{\theta z}^+ = 103$ $\tau_{rz}^+ = 47$ $\tau_{r\theta}^+ = 73$	$\sigma_z^- = 390$ $\sigma_\theta^- = 692$ $\sigma_r^- = 370$	$\tau_{\theta z}^- = 229$ $\tau_{rz}^- = 136$ $\tau_{r\theta}^- = 208$

ve1219.fm Page 31 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

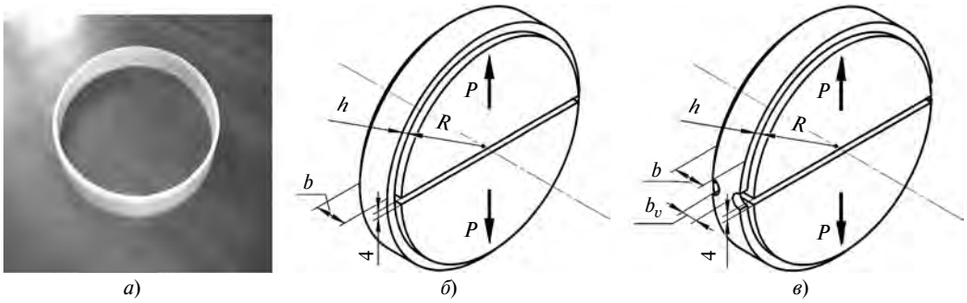


Рис. 2. Типы образцов для экспериментальных исследований

$$4R_{2323} = \frac{1}{\bar{\sigma}_{23}\bar{\sigma}_{23}^{+}};$$

$$2R_{1133} = \frac{R_{11} - R_{33}}{\bar{\sigma}_{13}} + R_{1111} + R_{3333} + \frac{1}{(\bar{\sigma}_{13})^2};$$

$$2R_{2233} = \frac{R_{22} - R_{33}}{\bar{\sigma}_{23}} + R_{2222} + R_{3333} + \frac{1}{(\bar{\sigma}_{23})^2}.$$

Изготовление образцов. Кольцевые образцы для проведения экспериментальных исследований были изготовлены восьми типоразмеров (по 5 образцов каждого типоразмера).

Образцы вырезали из стеклопластиковых труб, полученных методом косослойной продольно-поперечной намотки и выпускаемых ООО "Стеклопластиковые трубы" (г. Харьков). Общий вид кольцевых образцов показан на рис. 2, *а*. Геометрические размеры и форма кольцевых образцов соответствуют следующим стандартам проведения испытания методом растяжения кольцевых образцов полудисками (метод разрезного диска): ГОСТ 25.603—82 [19] — типоразмеры I—VI (рис. 2, *б*); ASTM D 2290—12 [20] — типоразмеры VII и VIII (рис. 2, *в*). Внутренний диаметр $D = 2R$ исследуемых стеклопластиковых труб составлял 100 и 130 мм. Толщина h стенки варьировалась от 2,8 до 5,8 мм.

Предел прочности в окружном направлении определяли по формуле

$$\sigma_{\theta}^{+} = \frac{P_{\max}}{S_1 + S_2},$$

где $P_{\max}$ — разрушающая нагрузка, МПа; $S_1 + S_2$ — начальная площадь поперечных сечений образца, мм^2.

Статистическая обработка результатов испытания проведена при доверительной вероятности согласно ГОСТ 8.207—76 [21].

В табл. 3 и 4 даны геометрические размеры и результаты проведенных испытаний кольцевых образцов в соответствии с положениями ГОСТ 25.603—82 и стандарта ASTM D 2290—12 соответственно.

Здесь $\bar{\sigma}_{\theta}^{+}$ — среднее арифметическое результатов измерений предела прочности кольца на растяжение в окружном направлении, $S(\bar{\sigma}_{\theta}^{+})$ — среднее

Таблица 3

Геометрические размеры образцов и экспериментальные значения предела прочности σ_{θ}^{+} (ГОСТ 25.603—82)

Типоразмер образца	Число образцов	b, мм	Коэффициент анизотропии K	$D = 2R$, мм	h, мм	$S_1 + S_2$, мм^2	$P_{\max}$, кН	$\bar{\sigma}_{\theta}^{+}$, МПа	$S(\bar{\sigma}_{\theta}^{+})$, МПа	V_{θ}, %
I	5	30,5	3,0	130	3,1	189,1	89,82	475,0	9,41	2,40
II	5	20,0	3,0	130	5,0	200,0	80,12	400,6	8,23	2,05
III	5	20,0	3,0	130	5,5	220,0	90,29	410,4	5,68	1,38
IV	5	30,5	3,0	130	5,0	305,0	114,70	376,0	7,17	1,91
V	5	30,0	1,2	100	3,1	186,0	67,59	363,4	8,76	2,41
VI	5	30,0	2,0	100	3,1	186,0	87,79	472,0	9,57	2,03

Таблица 4

Геометрические размеры образцов и экспериментальные значения предела прочности σ_{θ}^{+} (ASTM D 2290—12)

Типоразмер образца	Число образцов	Ширина кольца, мм		Коэффициент анизотропии K	D, мм	h, мм	$S_1 + S_2$, мм^2	$P_{\max}$, кН	$\bar{\sigma}_{\theta}^{+}$, МПа	$S(\bar{\sigma}_{\theta}^{+})$, МПа	V_{θ}, %
		b_V	b								
VII	5	15,5	30,5	3	100,0	2,8	86,8	43,83	505	6,03	1,19
VIII	5	15,5	30,5	2	100,0	5,8	179,8	62,21	346	9,96	2,88

ve1219.fm Page 32 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

квадратическое стандартное отклонение результатов измерений, V_θ — коэффициент вариации величины измерений.

Сравнивая пределы прочности, следует отметить, что применение разных методик испытаний кольцевых образцов рассматриваемых здесь стандартов незначительно влияет на экспериментально полученную величину предела прочности стеклопластиковой трубы в окружном направлении.

Как отмечают авторы работы [22], растяжение кольцевых образцов полудисками — наиболее простой метод получения и обработки результатов. Однако метод разрезного диска имеет существенные недостатки: во-первых, неравномерное распределение деформаций по окружности образца; во-вторых, воздействие на поверхности контакта образца и полудисков сил трения, что оказывает влияние на результаты эксперимента; в-третьих, что самое главное, концентрация напряжений около разъема полудисков вследствие изменения радиуса кривизны свободной части образца. Предложения о введении поправочных коэффициентов (например, в ГОСТ 17731—79* [23] предлагается формула $\sigma_\theta^+ = 1{,}28P_{\max}/S$, т. е. поправочный коэффициент $K = 1{,}28$) практического применения не нашли.

Моделирование растяжения кольцевых образцов. На рис. 3 дана конечно-элементная схема имитационной расчетной модели испытания на прочность кольцевого образца при растяжении методом разрезного диска согласно ГОСТ 25.603—82 (рис. 3, *а*) и ASTM D 2290—12 (рис. 3, *б*).

Вначале было изучено напряженно-деформированное состояние образца типоразмера III с коэффициентом анизотропии $K = 3$ и кодом армирования $[90^\circ_9/-45^\circ/\bar{0}^\circ]_s$. Геометрические размеры кольца: $b = 20{,}0$ мм, $h = 5{,}5$ мм, $D = 130$ мм (см. табл. 3). Исходные значения физико-механических характеристик кольца приняты согласно данным табл. 1 и 2. Экспериментальное значение разрушающей нагрузки $P_{\max} = 90{,}29$ кН (см. табл. 3).

При значении растягивающей нагрузки $P = 80$ кН максимальные напряжения в кольце согласно имитационной модели возникают в точках внутренней поверхности в зоне разъема полудисков. Вследствие изменения радиуса кривизны свободной части образца в нем концентрируются напряжения, МПа:

$$\sigma_z = 61, \quad \sigma_\theta = 602, \quad \sigma_r = 85,$$
$$\tau_{rz} = 9, \quad \tau_{r\theta} = 39, \quad \tau_{z\theta} = 22.$$

При этом критерий прочности (12) запишется в виде:

$$KR = 0{,}728 < 1.$$

Это означает, что разрушение материала в рассматриваемых точках внутренней поверхности образца не происходит.

В кольцевых образцах концентрация радиальных растягивающих напряжений σ_r оказывает небольшое влияние, зато численные значения касательных напряжений $\tau_{r\theta}$ могут превысить для исследуемого материала предел прочности межслойного сдвига $\tau_{r\theta}^+ = 73$ (см. табл. 2) еще до разрушения образца.

При растягивающей нагрузке $P = 90{,}29$ кН в точках внутренней поверхности кольца около разъема полудисков возникают максимальные напряжения, МПа:

$$\sigma_z = 63{,}9, \quad \sigma_\theta = 676, \quad \sigma_r = 99{,}1,$$
$$\tau_{rz} = 7{,}8, \quad \tau_{r\theta} = 58{,}1, \quad \tau_{z\theta} = 23{,}7.$$

Критерий прочности при растягивающей нагрузке $P = 90{,}29$ кН принимает вид:

$$KR = 0{,}962 \approx 1.$$

Также было изучено напряженно-деформированное состояние образца типоразмера VII с коэффициентом анизотропии $K = 3$ и кодом армирования $[90^\circ_9/-45^\circ/\bar{0}^\circ]_s$. Геометрические размеры кольца: $b = 30{,}5$ мм, $b_V = 15{,}5$ мм, $h = 2{,}8$ мм, $D = 100$ мм (см. табл. 4).

После ряда приближений растягивающую нагрузку P приняли равной 45,2 кН. Экспериментальное значение разрушающей нагрузки $P_{\max} = 43{,}83$ кН (см. табл. 4).

В кольце в точках внутренней поверхности сечения с минимальной площадью в зоне разъема полудисков возникают следующие максимальные напряжения, МПа:

$$\sigma_z = 93{,}5, \quad \sigma_\theta = 959, \quad \sigma_r = 11,$$
$$\tau_{rz} = 3, \quad \tau_{r\theta} = 12, \quad \tau_{z\theta} = 72.$$

При растягивающей нагрузке $P = 45{,}2$ кН критерий прочности принимает вид:

$$KR = 1{,}064 > 1.$$

Таким образом, критерий прочности больше единицы. Это означает, что в рассматриваемых точках внутренней поверхности образца происходит разрушение материала. Приняв теоретическое

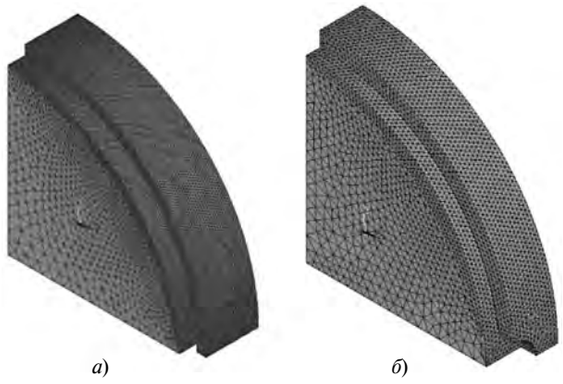


Рис. 3. Имитационная расчетная модель

значение предельной нагрузки $P = 45{,}2$ кН и сравнив его с экспериментально полученным значением разрушающей нагрузки $P_{\max} = 43{,}83$ кН, видим удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Относительная погрешность этих результатов составила 3 %.

Сравнение экспериментальных и численных результатов. Следует отметить, что экспериментальные значения предела прочности $\sigma_\theta^+ = 410{,}4$ МПа образцов типоразмера III (см. табл. 3) значительно меньше предела прочности $\sigma_\theta^+ = 505$ МПа образцов типоразмера VII (см. табл. 4). Как отмечалось ранее, это связано, прежде всего, с различием толщин испытуемых колец.

Напомним, что метод разрезного диска имеет существенные недостатки, один из которых — концентрация напряжений около разъема полудисков при нагружении. В связи с этим полученное по предлагаемой методике теоретическое значение предела прочности рассматриваемых образцов с коэффициентом анизотропии $K = 3$ равняется $\sigma_\theta^+ = 1246$ МПа, тогда как максимальное значение этой величины, полученное экспериментальным путем, составило $\sigma_\theta^+ = 505$ МПа. Увеличение экспериментального значения предела прочности $\sigma_\theta^+ = 505$ МПа введением поправочного коэффициента $K = 1{,}28$, принятого согласно ГОСТ 17731—79*, вносит несущественную поправку.

Выводы

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований подтверждает целесообразность феноменологического подхода к определению физико-механических характеристик стеклопластиковых труб на основе теории многослойных конструкций. Отмечается эффективность применения критерия прочности в тензорно-полиноминальной форме, когда учитываются напряжения и деформации поперечного сдвига σ_{i3}^+, σ_{i3}^- ($i, j = 1, 2$) и трансверсального отрыва или сжатия σ_{33}^+, σ_{33}^-.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Daniel I. M., Ishai O.** Engineering Mechanics of Composite Materials. Oxford: University Press, 1994. 395 p.
2. **Peters S. T.** Handbook of Composites. 2nd edition. New York: Springer-Verlag, 1998. 1120 p.
3. **Tsai S. W.** Composite Design. Thick Composites. Ohio, USA, 1987. 720 p.
4. **Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г.** Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
5. **Болотин В. В., Новичков Ю. Н.** Механика многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1980. 375 с.
6. **Васильев В. В.** Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
7. **Лехницкий С. Г.** Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.
8. **Zhao Qi., Hoa S. V.** Triaxial Woven Fabric (TWF) Composites with Open Holes (Part 1): Finite Element Models for Analysis // Journal of Composite Materials. 2003. V. 37. № 9. P. 763—789.
9. **Tabiei Ala, Ivanov Ivelin.** Fiber Reorientation in Laminated and Woven Composites for Finite Element Simulations // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2003. V. 16. P. 457—473.
10. **Finite** element analysis of composite revolution structures wound by wide plies J. P. Jeusette, G. Laschet, P. Chapentier, Ph. Deloo // Composite Structures. 1987. № 8. P. 221—237.
11. **Arsene S. A., Bai J.** New Approach to Measuring Transverse Properties of Structural Tubing by a Ring Test // Journal of Testing and Evaluation. 1996. V. 24. № 6. P. 386—391.
12. **Pressurized** Ring Test for Composite Pressure-Vessel Hoop Strength and Stiffness Evaluation / D. Cohen, Y. T. Toombes, A. K. Johnson, M. F. Hansen // Journal of Composites Technology and Research. 1995. № 17 (4). P. 331—340.
13. **Ring Hoop** Tension Test (RHTT): A Test for Transverse Tensile Properties of Tubular Materials / H. Wang, R. Bouchard, R. Eagleson et al. // Journal of Testing and Evaluation. 2002. V. 30. № 5. P. 382—391.
14. **Failure** of Carbon/epoxy Composite Tubes under Combined Axial and Torsional Loading I. Experimental Results and Prediction of Biaxial Strength by the use of Neutral Networks / C. S. Lee, W. Hwang, H. C. Park, K. S. Han // Composites Science and Technology. 1999. № 59. P. 1779—1788.
15. **Bai J., Seeleuthner Ph., Bompard P.** Mechanical Behaviour of ±55° Filament-wound Glass fiber/Epoxy Resin Tubes: I. Microstructural Analyses, Mechanical Behaviour and Damage Mechanism of Composite Tubes Under Pure Tensile Loading, Pure Internal Pressure, and Combined Loading // Composite Science and Technology. 1997. № 57. P. 141—153.
16. **The Rate Dependent** Behaviour of ±55° Filament-wound Glass fiber / Epoxy Tubes Under Biaxial Loading / M. Caroll, F. Ellyin, D. Kujawski, A. S. Chiu // Composite Science and Technology. 1995. № 55. P. 391—403.
17. **Верещака С. М., Данильцев В. В.** Физико-механические характеристики уплотнительного кольца рабочего колеса центробежного насоса из композиционного материала // Вестник машиностроения. 2017. № 4. С. 11—18.
18. **Малмейстер А. К.** Сопротивление полимерных и композитных материалов. Рига: Зинатне, 1980. 572 с.
19. **ГОСТ 25.603—82**. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на растяжение кольцевых образцов при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Изд-во стандартов, 1982. 12 с.
20. **ASTM D 2290—12.** Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method. 8 p.
21. **ГОСТ 8.207—76.** Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1976. 8 с.
22. **Композиционные** материалы: Справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др. / Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
23. **ГОСТ 17731—79*.** Материал П 5-7-ЛДП. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1979. 9 с.

ve1219.fm Page 34 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 621.891-192

С. В. ШИШКИН, д-р техн. наук (МАИ), e-mail: ssshisha@yandex.ru

Об экспериментальной оценке фреттингостойкости роликовых опор

Рассмотрено построение кривой фреттингостойкости опор и подшипников качения, аналогичное построению усталостной кривой. За критерий повреждения принят латентный период до начала схватывания рабочих поверхностей, фиксируемого визуально. Установлено, что предел фреттингостойкости зависит от вида смазочного материала, амплитуды относительного смещения и принятой базы испытаний. Существенное повышение стойкости к коррозионно-механическому повреждению достигается при нанесении регулярного микрорельефа на беговые дорожки опор качения.

Ключевые слова: фреттинг, напряжение, повреждение, амплитуда, смазка, схватывание, регулярный микрорельеф, латентный период.

The construction of the fretting resistance curve of bearings and roller bearings, similar to the construction of the fatigue curve, is considered. The latent period before the adhesion of working surfaces, which is visually determined, is accepted as the damage criterion. It is determined, that the fretting resistance limit depends on the type of lubricant, the amplitude of the relative displacement and the accepted test base. A significant increase in resistance to corrosion and mechanical damage is achieved by applying regular microrelief to the racetracks of the rolling bearings.

Keywords: fretting, stress, damage, amplitude, lubrication, adhesion, regular microrelief, latent period.

В ряде узлов и соединений деталей машин при условии возникновения в процессе эксплуатации малых осциллирующих смещений контактирующих поверхностей возможно появление на них коррозионно-механических повреждений. К таким узлам относятся прессовые, резьбовые, фланцевые, ниппельные, заклепочные соединения, подшипники, шарниры, шариковые и роликовые опоры, механические соединения трубопроводов и уплотнения. При этом фреттинг способствует разгерметизации уплотнений, повышению динамических нагрузок в подшипниках, ослаблению или заклиниванию посадок и сопряжений, инициирует объемное или контактное усталостное разрушение, резко повышает износ и коэффициент трения в соединениях.

В настоящее время в достаточно большом объеме накоплены результаты экспериментальных исследований процессов коррозионно-механического разрушения поверхностей при скольжении [1, 2], но данные по повреждаемости рабочих поверхностей вследствие фреттинга при качении практически отсутствуют. Следует отметить, что проблема обеспечения фреттингостойкости шарниров, подшипников качения, роликовых и шаровых опор представляет несомненный практический интерес.

Коррозионно-механические повреждения дорожек и тел качения в опорах и подшипниках имеют вид впадин и наростов от продуктов разрушения. Они существенно снижают контактную долговечность и грузоподъемность опор, увеличивают ударные нагрузки и виброактивность подшипников, приводят к увеличению силы страгивания в приборах, а иногда и к заклиниванию. Такие повреждения возникают при транспортировке изделий, в дублирующих агрегатах при наложении внешних вибраций, в роликовых и шаровых опорах, работающих при ударных нагрузках, а также в узлах и соединениях, эксплуатирующихся в условиях возвратно-вращательного перемещения (крестовина карданного вала автомобиля, подшипник поворотного сопла авиадвигателя, шарниры резьбовых домкратов механизации крыла и т. п.).

Процесс развития фреттинга в упорном роликоподшипнике типа 9000 показан на профилограммах 1—5 (рис. 1) в зависимости от числа N циклов. Вначале идет накопление продуктов повреждения и их частичное удаление из зоны контакта, при этом на плоскости опорных колец образуется светлая дорожка контакта, характерная для ложного бринеллирования. Разрушение беговых дорожек происходит в виде очагов схватывания, вырывания металла и его частичного налипания. Процесс коррозионно-механического повреждения подшипника носит вероятностный характер и интенсифицируется по мере наработки.

Для экспериментальных исследований повреждаемости от

Рис. 1. Развитие коррозионно-механических повреждений дорожек качения упорного роликоподшипника при его испытании на воздухе, без смазки, под нагрузкой σ_z = 250 МПа при амплитуде относительного смещения a_τ = 50 мкм в зависимости от числа циклов $N/10^5$ = 2 (*1*); 1,5 (*2*); 1,0 (*3*); 0,5 (*4*); 0,2 (*5*) (увеличение по вертикали 4000; по горизонтали 80)

ve1219.fm Page 35 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

фреттинга при качении на имитаторах роликовых опор была спроектирована и изготовлена специальная установка (рис. 2), которая позволяет проводить испытания в широком диапазоне контактной нагрузки, в условиях различных смазок и рабочих сред, при нормальной и повышенной температуре для заданной амплитуды смещения ролика относительно опорной плоскости. Установка оснащена некоторыми периферийными устройствами, которые помимо моделирования коррозионно-механических повреждений позволяют измерять: электропроводность контакта ролик—плита в динамике с помощью измерительного моста Р-316; контактное сближение тел индуктивным датчиком измерительной системы 214 завода "Калибр"; амплитуду и коэффициент трения — на шлейфовом осциллографе Н-105. Амплитуда a_τ смещения в статике устанавливается за счет эксцентриситета расточной головки. Для устранения перекосов роликов и правильной установки номинального контактного давления, в том числе и его концентрации, используется трехопорная схема нагружения (две опоры ролика — плита и промежуточная опора с подшипником рычага узла нагружения). Типичный вид повреждений дорожек качения роликовой опоры на воздухе без смазки представлен на рис. 3. При наличии специального приспособления конструкция установки позволяет проводить натурные испытания упорных и радиально-упорных шариковых и роликовых подшипников.

При оценке коррозионно-механического повреждения основная проблема заключается в обосновании критерия разрушения. Попытки косвенной оценки повреждаемости контактных поверхностей деталей от фреттинга при измерении коэффициента трения или электрического сопротивления опоры не увенчались успехом. Так, например, зависимость сопротивления контакта от числа циклов представляет собой совокупность пиков и спадов, где пик соответствует накоплению продуктов фреттинга, а спад — их выносу из зоны контакта. Однако определить величину латентного периода, т. е. начало схватывания рабочих поверхностей, данным методом не представляется возможным.

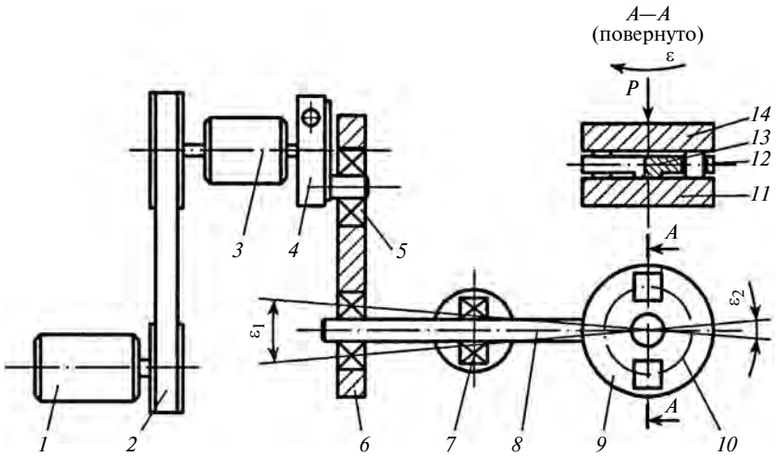


Рис. 2. Схема установки для испытаний роликовых опор качения на фреттингостойкость:

1 — электродвигатель; *2* — клиноременная передача; *3* — расточная головка; *4* — шпиндель с пальцем устанавливаемого эксцентриситета; *5* — сферический самоустанавливающийся подшипник; *6* — шатун; *7* — промежуточная опора с подшипником; *8* — рычаг; *9* — узел нагружения; *10* — средняя окружность роликов задания амплитуды смещения; *11* — нижняя неподвижная опора; *12* — ролик; *13* — сепаратор; *14* — верхняя подвижная опора

Выбор критерия экспериментальной оценки фреттингостойкости опоры можно обосновать предельно допустимым снижением функционального параметра подшипника, который лимитирует его работоспособность. Подобными параметрами могут быть статическая грузоподъемность, контактная долговечность или допустимый уровень вибраций. Как правило, на телах и дорожках качения в подшипниках появление питтингов и следов коррозии не допускается. Поэтому естественным критерием стойкости подшипника является величина латентного периода до момента схватывания рабочих поверхностей, которое сопровождается вырыванием частиц металла из одной поверхности и его частичным "намазыванием" на сопряженную деталь, обычно более твердую. Наличие же быстро удаляемых следов коррозии допускается. Следует отметить, что в условиях избытка смазки фреттинг при качении в основном проявляется в виде "намазывания"; при этом на рабочих поверхностях беговых дорожек образуются наросты частиц металла и продуктов разрушения, которые способствуют резкому повышению уровня вибраций. Следы коррозии и ржавчина, как правило, отсутствуют, а твердость таких наростов выше твердости основного металла.

Процесс повреждаемости рабочей поверхности при качении исследовался визуально при на-

Рис. 3. Типичный вид начального повреждения поверхности контртела имитатора роликовой опоры при испытании на воздухе без смазки

ve1219.fm Page 36 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

блюдении под микроскопом, обладающим стереоэффектом, при увеличении в 4—7 раз. Испытания проводили на моделях роликовых опор по схеме ролик—плоскость. Ролики диаметром и длиной 10 мм из стали ШХ-15 подвергали закалке до твердости 56÷62 $HRC_э$, шлифовали и полировали. Контртела выполняли из стали 30ХГСА и после закалки шлифовали и выглаживали натуральными алмазами с $R_{сф}$ = 1,5 мм с усилием на индентор $P_у$ = 200 Н, при этом микротвердость поверхности составляла H_μ = 6200 МПа. Основные требования к образцам: отклонение по твердости не более 8 %, параметр шероховатости поверхности контртела Rz < 0,8 мкм, роликов — Rz < 1,2 мкм, допускаемая волнистость деталей не более 0,5 мкм. Отклонения формы контртел от плоскости не более 0,0025 мм. Разность диаметров роликов в паре не допускается, поэтому они подбираются селективно с точностью до 0,001 мм.

Использование в качестве критерия коррозионно-механического повреждения поверхности при качении значения наработки до момента схватывания тел позволяет построить кривую фреттингостойкости опоры, аналогичную обычной кривой выносливости в двойных логарифмических координатах напряжение — число циклов. Особенность применения данной методики состоит в том, что определить момент разрушения без разборки опоры невозможно, поэтому под микроскопом фиксируется наличие повреждения или его отсутствие в точке с координатами σ и N. Данное обстоятельство обусловливает специфику построения кривой фреттингостойкости пары качения. При испытании большого числа образцов (не менее 20÷30), как правило, используют метод ступенчатого увеличения нагрузки; при этом определяют среднее значение $\bar{\sigma}_z$ предела фреттингостойкости на заданной базе $N_б$ и его среднее квадратичное отклонение S_{σ_z} в соответствии с работой [3]:

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_z^{ож} + d\left(\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{b} in_i \pm 0{,}5\right); \quad (1)$$

$$S_{\sigma_z} = 1{,}62d\left[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{b} i^2 n - \frac{1}{m^2}\left(\sum_{i=1}^{b} in\right)^2 + 0{,}029\right],$$

где $\sigma_z^{ож}$ — ожидаемый предел фреттингостойкости; d — интервал между уровнями напряжений; i — порядковый номер уровня нагружения; m — общее число разрушений ($m = m'$) или неразрушений ($m = m''$) образца (если $m' > m''$, то $m = m''$ и в формуле (1) принимается знак "+", если $m' < m''$, то $m = m'$ и в формуле (1) принимается знак "−"); n_i — число разрушений (или неразрушений) образцов на i-м уровне нагружения (если $n_i' > n_i''$, то $n_i = n_i''$; если $n_i' < n_i''$, то $n_i = n_i'$).

Аналогично можно определить уровень контактных напряжений оценки фреттингостойкости пары при любом заданном числе циклов. Как правило, база испытаний принимается в пределах (1÷5)10^6 циклов, при сравнительных испытаниях — 10^5÷10^6 циклов. Методика построения кривой выносливости пары качения при коррозионно-механическом повреждении следующая. При заданной контактной нагрузке $\sigma_z = 0{,}787\sigma_{z\,max}$ определяется минимальное число циклов N_{min}, которое образец выдерживает без повреждения; при этом на данном уровне испытывают не менее 3÷5 образцов. Если имеет место повреждение рабочей поверхности, то число N_{min} циклов уменьшают в 2 раза, в противном случае его увеличивают в 2 раза и т. д. Интервал или ошибку в определении N_{min} устанавливали в пределах 5 %.

Типичные кривые фреттингостойкости эталонной роликовой опоры при испытании на воздухе без смазки и со смазкой (масло АМГ-10) с амплитудой смещений ролика относительно рабочей поверхности контртела a_τ = 50 мкм представлены на рис. 4. При этом кривые фреттингостойкос-

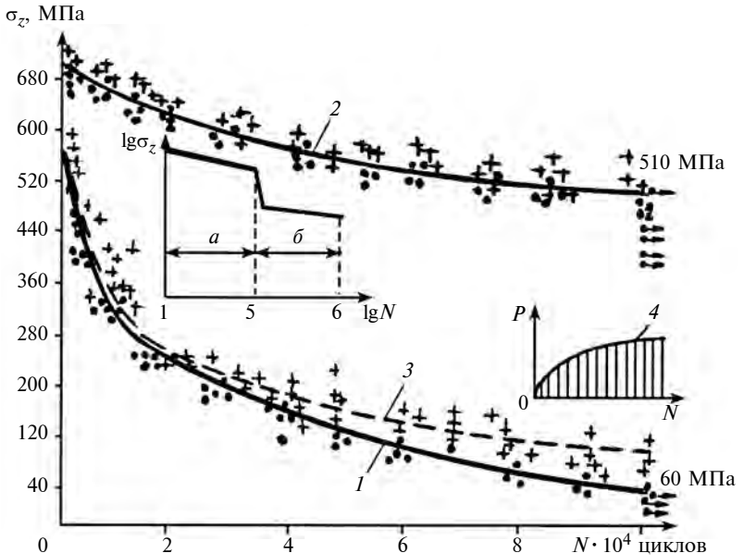


Рис. 4. Кривые фреттингостойкости роликовых опор при испытании на воздухе без смазки (*1*) и со смазкой АМГ-10 (*2*) по критерию начала схватывания рабочих поверхностей при амплитуде 50 мкм:

3 — кривая повреждаемости по заданному уровню вероятности *P* разрушения; *4* — вероятностная кривая повреждаемости опоры на заданном уровне нагружения, *а* — зона ограниченной стойкости к повреждению от фреттинга, *б* — зона фреттингостойкости. Точки — неразрушение поверхности; крестики — повреждение

ти можно разбить на два участка: зону ограниченной долговечности и собственно область фреттингостойкости, аналогично кривым выносливости. Если на каком-то уровне нагрузки определить интервал $N_c \div N_p$, числа циклов, в котором вероятность повреждения от P фреттинга изменяется от 0 при N_c до 1 при N_p, разбить этот интервал на участки и провести испытания, то в результате можно получить вероятностную кривую *4* (см. рис. 4) фреттингостойкости пары качения при заданной нагрузке. Имея данные для нескольких уровней нагружения и задаваясь вероятностью повреждения или неразрушения роликовой опоры, можно построить всю вероятностную кривую фреттингостойкости по N_c или повреждаемости по N_p. Естественно, что при статистической оценке результатов испытаний пригоден весь вероятностно-статистический математический аппарат, который используется при проведении испытаний на выносливость [3].

Статистическую обработку результатов испытаний проводили на основе корреляционного и линейного регрессионного анализов в соответствии с работой [3] для малого числа экспериментов. Вначале по критерию Фишера проверяли наличие корреляционной связи между случайными величинами $\lg\sigma_z$ и $\lg N$, для чего определяли выборочный коэффициент корреляции

$$r = \frac{m_{1/1}}{S_{\lg\sigma_z} S_{\lg\overline{N}}},$$

где

$$m_{1/1} = \frac{1}{n-1}\left(\sum_{i=1}^{n} \lg\overline{N}_i \lg\overline{\sigma}_{iz} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lg N_i \sum_{i=1}^{n} \lg\sigma_{iz}\right);$$

$$S_{\lg\overline{N}} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n} \lg\overline{N}_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} \lg N_i\right)^2\right]};$$

$$S_{\lg\sigma_z} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n} \lg\sigma_{iz}^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} \lg\sigma_{iz}\right)^2\right]},$$

и проверяли условие $z \le z_{1-\alpha/2}\chi_z$, где

$$z = \frac{1}{2}\ln\frac{1+r}{1-r}; \quad \chi_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}.$$

Кривые фреттингостойкости по участкам долговечности удовлетворительно описываются законом Вейбулла:

$$\sigma_z = C\overline{N}^m$$

или

$$\lg\sigma_z = \lg C + n\lg\overline{N}.$$

Коэффициенты m и C определяются по формулам метода наименьших квадратов:

$$m = rS_{\lg\overline{\sigma}_z}/S_{\lg\overline{N}};$$

$$C = \lg\overline{\sigma}_z - m\lg\overline{N},$$

где

$$\lg\overline{\sigma}_z = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lg_{iz};$$

$$\lg\overline{N} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lg N_i.$$

Оценку дисперсии параметров C и m линии регрессии, а также величины $\lg\sigma_z$ проводят по соотношениям:

$$S_C^2 = \frac{(1-r)(n-1)}{n(n-2)} S_{\lg\sigma_z}^2;$$

$$S_m^2 = \frac{(1-r)(n-1)S_{\lg\sigma_z}^2}{(n-2)\sum_{i=1}^{n} (\lg N_i - \lg\overline{N})^2};$$

$$S_{\lg\sigma_z}^2 = S_C^2 + S_m^2(\lg N - \lg\overline{N})^2.$$

Мера индивидуального рассеивания вокруг линии регрессии

$$\delta_{\lg\sigma_z} = S_{\lg\sigma_z}\sqrt{(1-r^2)\frac{n-1}{n-2}}.$$

Доверительные границы для параметров α и β уравнения теоретической линии регрессии $\eta = \alpha + \beta(\lg N - \lg\overline{N})$ и генерального среднего значения η составляют:

$$C - t_{\alpha,k}S_C < \alpha < C + t_{\alpha,k}S_C;$$

$$m - t_{\alpha,k}S_m < \beta < m + t_{\alpha,k}S_m;$$

$$\lg\sigma_z - t_{\alpha,k}S_{\lg\sigma_z} < \eta < \lg\sigma_z + t_{\alpha,k}S_{\lg\sigma_z},$$

где $t_{\alpha,k}$ — коэффициент Стьюдента для $k = n - 2$ и $\alpha = 0{,}05$.

По описанной выше методике были проведены исследования влияния некоторых конструктивных и технологических факторов роликовых опор на их фреттингостойкость при испытании на воздухе без смазки и со смазкой АМГ-10 при нормальной температуре и амплитуде 50 мкм. В табл. 1 в числителях дробей приведены значения σ_z для различных радиусов r закругления фаски роликов, а в табл. 2 — пределы фреттингостойкости в зависимости от угла α их конической фаски. В знаменателях дробей в табл. 1 и 2 даны отношения предела фреттингостойкости пары к эталонному значению.

Из анализа полученных данных следует, что выносливость роликовых опор к коррозионно-механическому повреждению существенно возрастает при снижении концентрации контактной нагрузки у торцов ролика (см. табл. 1). В этом плане коническая фаска как конструктивный элемент неэффективна (см. табл. 2). Резкое снижение предела фреттингостойкости отмечается при увеличении разности диаметров роликов, т. е. при перекосе контртела, что вызывает заметное увеличение концентрации контактных напряжений. Так, при разности диаметров роликов, равной 0 мкм, σ_z = 510 МПа (это эталонное значение принимаем за 1,00 для дальнейшего сравнения значений σ_z); при разности диаметров 1 мкм σ_z = 500 МПа (0,98 от эталона); при разности 2 мкм σ_z = 480 МПа (0,94); при 4 мкм σ_z = 460 МПа (0,90); при

ve1219.fm Page 38 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

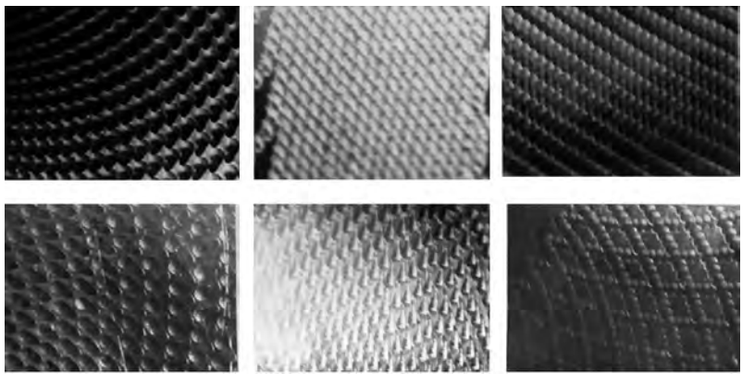


Рис. 5. Виды поверхностей с регулярным микрорельефом, полученным ударным упрочнением с разным углом наклона индентора

Рис. 6. Сеточный микрорельеф на дорожке качения наружного кольца конического роликоподшипника, увеличивающий его стойкость к коррозионно-механическому повреждению

6 мкм σ_z = 420 МПа (0,82) и при 10 мкм σ_z = 320 МПа (0,63). Установлено, что фреттинг проявляется в интервале амплитуд относительного смещения контактирующих деталей 20÷150 мкм.

Таблица 1

Предел фреттингостойкости σ_z, МПа, роликовой опоры в зависимости от радиуса *r* фаски ролика

Смазка	Радиус *r*, мм					
	0	1	2	5	10	20
Без смазки	60/1	130/2,16	138/2,30	150/2,50	170/2,84	180/3,0
АМГ-10	510/1	600/1,18	680/1,33	750/1,47	820/1,64	860/1,68

Таблица 2

Предел фреттингостойкости σ_z, МПа, роликовой опоры в зависимости от угла α конической фаски ролика

Смазка	Угол α, град.				
	90	45	30	10	5
Без смазки	60/1	55/0,92	65/1,08	68/1,13	72/1,20
АМГ-10	510/1	520/1,02	600/1,18	620/1,22	700/1,37

Примечание. В числителях дробей даны σ_z, в знаменателях — отношения σ_z к эталонному значению.

Таблица 3

Предел фреттингостойкости σ_z, МПа, роликовых опор в зависимости от регулярного микрорельефа контртела

Микрорельеф	Без смазки	С АМГ-10
Шлифованного и полированного контртела	80/1,33	450/0,88
Эталонный	60/1	510/1
На контртеле в виде винтовой канавки	280/4,67	1260/2,47
Сеточный на контртеле	300/5,0	1420/2,79
После вибровыглаживания контртела	250/4,17	1220/2,39
После упрочнения контртела косым ударом	250/4,17	1200/2,35
Винтовой на роликах	360/6,0	1640/3,22
Выпуклого из-за винтового рельефа ролика	400/6,67	1800/3,53

Примечание. В числителях дробей даны σ_z, в знаменателях — отношения σ_z к эталонному значению.

Анализ полученных при экспериментах данных (табл. 3) показал, что весьма эффективным технологическим мероприятием с точки зрения повышения фреттингостойкости роликовых опор является нанесение на рабочие поверхности специальных регулярных микрорельефов методами алмазного выглаживания, вибровыглаживания и ударного упрочнения (рис. 5) [4].

Повышение фреттингостойкости поверхности объясняется резким снижением концентрации напряжений вследствие повышения деформативной способности стыка, т. е. последний работает как мягкое демпфирующее покрытие. Наличие полостей (канавок) способствует выносу продуктов повреждения из зоны контакта и лучшему удерживанию смазки. Упрочнение же поверхности алмазным выглаживанием технологически неэффективно.

На рис. 6 показан конический роликоподшипник 7209, на беговые дорожки колец которого нанесен сеточный микрорельеф с целью его защиты от фреттинга. Испытания показали, что основные параметры качества таких подшипников практически не снижаются, а их контактная выносливость даже возрастает из-за лучшего удерживания смазки и снижения концентрации контактной нагрузки под торцами роликов.

Таким образом, разработанная методика испытаний и получен-

ve1219.fm Page 39 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9.048

А. А. ГРУЗДЕВ, канд. техн. наук, Ю. А. МОРГУНОВ, канд. техн. наук, Б. П. САУШКИН, д-р техн. наук, Н. В. ХОМЯКОВА (Московский политехнический университет), e-mail: morgunov56@mail.ru

Электроэрозионная прошивка отверстий малого диаметра в фильтрах с наложением ультразвука

Исследована операция электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра с наложением ультразвука при изготовлении фильтра. Разработаны конструкция и технология изготовления электродов-инструментов для одновременной обработки всего массива отверстий. Выполнена оценка технико-экономической эффективности предложенной технологии.

Ключевые слова: многоэлектродная обработка, электроэрозионная прошивка, массив отверстий, электрод-инструмент, ультразвук.

The operation of electroerosive broaching of small-diameter holes with the application of ultrasound in the manufacture of a filter is investigated. The design and manufacturing technology of electrode-tools for simultaneous processing of the entire array of holes is developed. An assessment of the technical and economic effectiveness of the proposed technology is performed.

Keywords: multi-electrode processing, electroerosive broaching, array of holes, electrode-tool, ultrasound.

Анализ развития и применения методов электроэрозионной обработки изделий показал их высокую востребованность [1—4]. Быстро развиваются комбинированные методы и технологии получения отверстий, в основе которых лежит электроэрозионный процесс [5, 6]. Так, введение в рабочую зону электроэрозионного станка ультразвуковых колебаний значительно повышает производительность обработки [7—9].

Изготовление отверстий малого диаметра в фильтр-элементах — весьма сложная задача, которая в ряде случаев решается многоэлектродной электроэрозионной обработкой. Однако проектирование данной технологии в публикациях практически не отражено, и отсутствуют необходимые справочно-нормативные материалы [10].

В работах [11, 12] на основании экспериментальных исследований сформулированы технологические рекомендации для проектирования операции электроэрозионной прошивки (ЭЭП) отверстий малого диаметра с наложением ультразвука (УЗ), которые были использованы при разработке технологии ЭЭП отверстий в фильтрах агрегатов подачи топлива из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5949—75).

Основная трудность при проектировании технологического процесса связана с изготовлением массива из 580 отверстий диаметром $0{,}25^{+0{,}05}$ мм. При этом заусенцы и притупление кромок отверстий недопустимы.

Выбор электроэрозионной обработки обусловлен результатами анализа разных способов перфорации отверстий, проведенного методом экспертной оценки (табл. 1).

Электрохимическая обработка (ЭХО), в данном случае струйная, не применима из-за неизбежного притупления кромки и высокой вероятности растравливания тонкой (0,2 мм) перемычки между отверстиями. Изготовление массива отверстий механической обработкой (МО) повлечет за собой трудоемкую слесарную операцию по удалению заусенцев. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) в сравнении с электронно-лучевой (ЭЛО) и свето-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 34)

ные данные экспериментальных исследований позволяют объективно оценивать фреттингостойкость подшипников, шарнирных соединений, роликовых и шаровых опор в соответствующих условиях эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В.** Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974. 272 с.

2. **Уоттерхауз Р. Б.** Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение, 1976. 276 с.

3. **Степнов М. Е.** Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1972. 232 с.

4. **Хворостухин Л. А., Шишкин С. В., Ковалев А. П.** Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.

ve1219.fm Page 40 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

лучевой (СЛО) обработками не требует дорогостоящего оборудования и снижает тепловую нагрузку на деталь при обработке.

Для апробации технологии использовали фильтр-элемент с отверстиями ромбического сечения с острым углом 65° при вершине и диаметром 0,25 мм вписанной окружности. Расчетные диагонали ромба составили 0,46 и 0,3 мм. Фактические размеры изготовленного инструмента: диагонали соответственно 0,43 и 0,28 мм, диаметр вписанной окружности 0,23 мм.

Для изготовления фильтр-элемента создали многоэлектродный инструмент, рабочая часть которого показана на рис. 1.

Фотография торца рабочей части электрода-инструмента (ЭИ) представлена на рис. 2.

Рабочую часть ЭИ изготовляли на электроэрозионном проволочно-вырезном станке СВЭИ-1 с использованием электрода-проволоки диаметром 0,15 мм. На последующей слесарной операции удаляли периферийные электроды неполного профиля. Рабочая длина электрода составила 4,5 мм, что позволило использовать его для изготовления фильтров. Дальнейшее увеличение длины рабочей части электродов снижает жесткость электродов-стержней, повышает вероятность их изгиба, что может привести к выходу из строя всего ЭИ.

Эксперименты по выбору материала ЭИ (исследовали вольфрам, медь, латунь) показали, что при использовании вольфрамового ЭИ имеет место хрупкое разрушение электродов, что приводило к браку детали при обработке. Поэтому в качестве материала для ЭИ выбрана латунь, обеспечивающая достаточную жесткость электродов-стержней.

Таблица 1

Сравнение разных методов перфорации отверстий малого диаметра

Способ обработки	Производительность	Себестоимость	Трудоемкость	Вероятность отказов (причины)
МО	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая (поломка и извлечение сверла)
ЭЛО	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая (требования точности, требования к кромке, коробление диска)
СЛО	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая (требования точности, требования к кромке, коробление диска)
ЭЭО	Низкая	Средняя	Средняя	Низкая (контроль состояния инструмента)

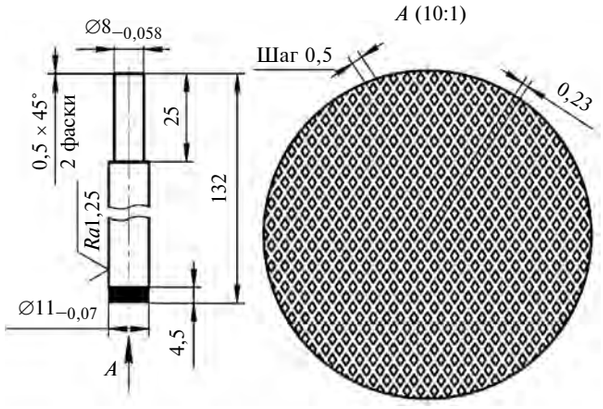


Рис. 1. Специальный концевой многоэлектродный ЭИ

Рис. 2. Торец рабочей части инструмента

Также были приняты во внимание технологические рекомендации, основанные на экспериментальных исследованиях [11—13]:

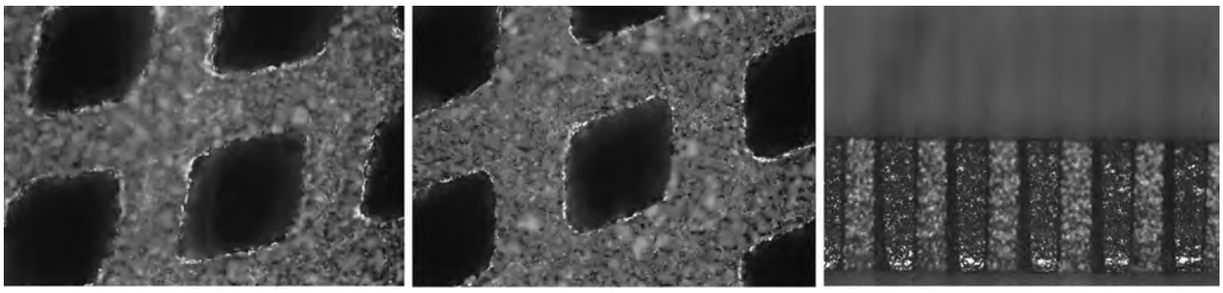
1. Обработку отверстий диаметром $d < 0{,}6$ мм рекомендуется осуществлять с наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) на деталь, что конструктивно упрощает и удешевляет оснастку.

2. Наложение УЗК интенсифицирует удаления продуктов разряда из межэлектродного промежутка (МЭП), повышает производительность обработки в 1,5—2 раза, снижает шероховатость поверхности на 15÷20 %, стабилизирует технологический процесс, увеличивает в 1,5—2 раза глубину прошивки при прочих равных условиях.

3. Рекомендуемые параметры УЗК: частота колебаний $f_{УЗ} = 20 \div 22$ кГц; амплитуда колебаний $A = (0{,}25 \div 0{,}5)a_т$ (где $a_т$ — торцевой зазор).

4. В качестве рабочей жидкости рекомендуется использовать дистиллированную воду или техническую воду (ГОСТ 9.314—90), которые не должны содержать твердые частицы более 2÷5 мкм. Обработку отверстий диаметром 0,05÷0,25 мм и обработку массивов отверстий с малыми перемычками рекомендуется выполнять в керосине или синтезированном диэлектрике низкой вязкости, обладающими высокой проникающей способностью.

ve1219.fm Page 41 Friday, November 15, 2019 2:31 PM



а) *б*) *в*)

Рис. 3. Фотографии массива отверстий со сторон входа (*а*) и выхода (*б*) инструмента, продольный разрез фильтра (*в*)

5. Анализ полученных результатов показал, что при прошивке качественных отверстий диаметром 0,1÷0,5 мм целесообразно использовать импульсы длительностью $\tau_и < 2÷3$ мкс с энергией разряда $W_и < 3$ мДж.

6. При обработке в воде регулирование энергии разряда, как правило, осуществляют заданием длительности разрядного импульса. Чем меньше длительность импульса, тем выше доля паров металла, выброшенных в МЭП относительно жидкой фазы, а следовательно, меньше средние размеры твердых продуктов эрозии. Поскольку пары конденсируются и агрегатируются в частицы диаметром менее 1 мкм, то облегчается удаление продуктов эрозии из МЭП.

7. Длительность $\tau_п$ паузы влияет на коэффициент $k_{эф}$ эффективности использования импульсов, определяющий производительность прошивки. Продолжительность паузы определяется по формуле $\tau_п > K_2[\tau_1]$, где τ_1 — время существования газового пузыря, генерируемого разрядным импульсом; K_2 — коэффициент, зависящий от площади обрабатываемой поверхности и энергии импульса.

8. Для улучшения условий удаления продуктов разряда рекомендуется использовать схему синхронизации УЗК и импульсов напряжения, согласно которой импульсы напряжения приходятся на фазу максимального сближения ЭИ и детали [14].

Эксперименты осуществляли на электроэрозионном прошивочном станке ЭПП-8 с генератором ГОРН-Т2.

Техническая характеристика генератора ГОРН-Т2

Напряжение между электродами U, В	20÷200
Средняя сила тока $I_{ср}$, А	1÷15
Длительность импульса $\tau_и$, мкс	1÷30
Частота следования импульсов f, кГц	1÷100

Станок оснащали устройством возбуждения УЗК с магнитострикционным преобразователем. Ультразвуковые колебания накладывали на приспособление с закрепленной в нем деталью в направлении, параллельном оси отверстия. При оценке влияния ультразвукового поля использовали колебания с частотой 22 кГц и амплитудой 5÷10 мкм.

При проектировании ЭЭО отверстий рассматривали два варианта структуры операции: Т1 — с последовательным изготовлением одиночных отверстий; Т2 — с единовременной прошивкой отверстий многоэлектродным инструментом.

Было установлено, что многоэлектродная обработка предпочтительна ввиду особенностей протекания ЭЭО. После пробоя МЭП в рабочем зазоре формируется парогазовый пузырь, вытесняющий жидкость и удаляющий продукты эрозии. Пузырь некоторое время расширяется, давление в нем падает до его схлопывания и разрушения. Прохождение следующих рабочих разрядных импульсов невозможно до разрушения пузыря и релаксации МЭП. При многоэлектродной обработке площадь обработки пропорциональна числу отверстий (98,6 мм^2) и существенно больше площади одного из них (0,17 мм^2), поэтому частота следования разрядных импульсов в одном и том же отверстии заметно снизится, и условия удаления продуктов эрозии из него улучшатся.

Параметры режима подбирали исходя из устойчивого протекания процесса прошивки с учетом приведенных выше рекомендаций (табл. 2).

Снижение длительности импульса в варианте Т2, а следовательно, и размеров продуктов эрозии вызвано необходимостью их удаления из центральной зоны прошиваемого массива к периферии сквозь межэлектродные щели. Для компенсации снижения мощности импульсного разряда частоту следования импульсов повысили до 44 кГц.

На рис. 3 представлены фотографии массива отверстий со сторон входа и выхода инструмента, а также продольный разрез фильтра. Отверстия и со стороны входа, и со стороны выхода инструмента имеют заданную форму, кромки — без заусенца и

Таблица 2

Параметры режима обработки по вариантам операции

Вариант	$\tau_и$, мкс	f, кГц	$W_и$, мДж	$U_{хх}$, В
Т1	2	5	3,5	120
Т2	1	44	1,2	120

ve1219.fm Page 42 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Рис. 4. Фильтр

не притуплены, в углах сформированы радиусы в связи с быстрым изнашиванием острых боковых кромок инструмента. Ромбовидная форма сечения сохраняется, стороны ромба прямолинейные.

В табл. 3 приведены параметры сечений десяти отверстий на входе инструмента в деталь и выходе из нее, а также параметры десяти электродов-стержней инструмента в торцевом сечении перед обработкой. По диагоналям ромба рассчитывали площадь S сечения и объем V отверстия. Погрешности, связанные со скруглением углов ромба, не превышают 4 % от номинальных величин.

Боковой зазор $a_б$ рассчитывали двумя способами: как разность измеренных радиусов окружностей отверстия ($r_{от}$) и инструмента ($r_и$) (см. табл. 3, числитель); по выражению, вытекающему из равенства разности площади $S_{от}$ отверстия и площади $S_и$ инструмента, т. е. площади сечения бокового зазора, произведению периметра П инструмента на величину среднего бокового зазора (см. табл. 3, знаменатель):

$$a_б = (S_{от} - S_и)/П. \quad (1)$$

Определение зазора $a_б$ вторым способом дает большие значения, но с более высокой погрешностью. Торцевой зазор $a_т$ рассчитывали с учетом $a_б/a_т = 1{,}5$. Фактический зазор (20 мкм), измеренный на станке, незначительно отличается от рассчитанного.

Для оценки погрешности формы в продольном сечении использовали фотографии продольного разреза отверстия. Измерения показали, что отклонение размера по длине отверстия не превышает 5 мкм, что согласуется с оценкой, выполненной по диаметрам вписанной окружности на входе и выходе из отверстия (см. табл. 3).

На рис. 4 приведены фотографии перфорированных образцов, полученных при параметрах режима обработки, которые представлены в табл. 2.

При прошивке отверстий измеряли машинное время обработки, по длине и объему отверстия находили среднюю линейную скорость эрозии:

$$v_{эк} = h/t_м; \quad v_{об.эк} = V/t_м,$$

где h — глубина отверстия; V — объем соответственно отверстия (Т1) или массива отверстий (Т2); $t_м$ — машинное время обработки при постоянной подаче ЭИ (без учета врезания и перебега).

Машинное время $t_м^*$ определяли с учетом врезания и перебега (0,8 мм), необходимого для калибровки отверстия (табл. 4). При прошивке одного отверстия: $t_м = 0{,}42$ мин, $t_м^* = 0{,}72$ мин. Время $t_м^*$ использовали для нормирования операции, а время $t_м$ — для расчетов, связанных с определением фактического коэффициента эффективности.

На рис. 5 представлена циклограмма перемещения инструмента при прошивке массива отверстий, на которой можно условно выделить три участка.

Первый участок (до $h = 0{,}4$ мм) — врезание, скорость подачи ЭИ снижается с заданной величины

Таблица 3

Размеры отверстий и инструмента

Сечение	D_1, мм	D_2, мм	d, мм	S, мм^2	V, мм^3	П, мм	$a_б$*, мкм	$a_т$, мкм
На входе	0,50 ± 0,02	0,35 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,16÷0,18	0,12÷0,14	1,22	30/45	20÷30
На выходе	0,47 ± 0,01	0,33 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,15÷0,16		1,15	25/30	16÷20
На торце ЭИ	0,43 ± 0,02	0,28 ± 0,02	0,23 ± 0,02	0,11÷0,13	—	—	—	—

* В числителе ($r_{от} - r_и$), в знаменателе формула (1).

Таблица 4

Составляющие штучно-калькуляционного времени, экспериментальные и расчетные параметры кинематики, фактический коэффициент эффективности для двух вариантов обработки

Вариант	$t_м$, мин	$t_м$*, мин	$t_в$, мин	$t_{оп}$, мин	$v_{эк}$, м/мин	$v_{об.эк}$, мм^3/мин	$v_р$, мм/мин	$v_{об.р}$, мм^3/мин	$k_{эф}$
Т1	244	418,0	473,0	891	1,900	0,33	27,600	4,7	0,07
Т2	30	40,3	6,7	47	0,026	2,13	0,144	14,2	0,15

ve1219.fm Page 43 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

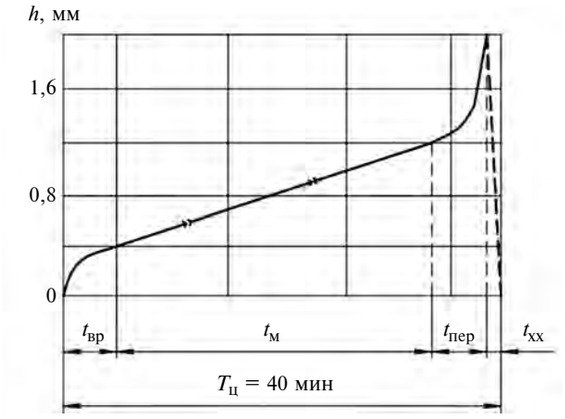


Рис. 5. Циклограмма перемещения многоэлектродного инструмента

($v_п$ = 0,1 мм/мин) до некоторого установившегося значения $v_п$.

Второй участок (0,4 < h < 1,2 мм) — прошивка отверстий со скоростью $v_п$ заглубления ЭИ в деталь.

Третий участок (1,2 мм < h < 1,6 мм) — калибровка отверстия для устранения конусности в продольном сечении (перебег). На этом участке нет проблем с удалением продуктов эрозии из МЭП, скорость прошивки увеличивается до заданной величины, после чего происходит реверс и возврат инструмента в исходное положение.

Вспомогательное время для варианта Т1 при данных условиях обработки определяли по формуле

$$t_в = N(t_{рз} + t_{подр}) + n_1 t_{запр} + n_2 t_{пер} + t_{ув},$$

где N — число отверстий в массиве; $t_{рз}$ = 0,02 мин — время определения положения детали (касание ЭИ поверхности детали) и отвода ЭИ на рабочий зазор; $t_{под}$ = 0,75 мин — время подрезки, включающее в себя время вывода ЭИ из прошитого отверстия, его перемещение в позицию подрезки, время определения положения правящего инструмента, подвода ЭИ на рабочий зазор, время подрезки, время перемещения ЭИ в исходное положение; $t_{зап}$ = 4,7 мин — время, необходимое для заправки нового ЭИ после изнашивания предыдущего; $t_{пер}$ = 0,08 мин — время перехвата ЭИ электромагнитами после выработки рабочей длины; $t_{ув}$ = 6 мин — время на установку и закрепление детали и включение станка; n_1 — число заправок нового инструмента; n_2 — число перехватов после выработки рабочей длины ЭИ.

В нашем случае при обработке массива единичным инструментом за время всего цикла обработки число заправок и переходов составляют: n_1 = 4, n_2 = 33. Рабочая длина — расстояние между торцом кондуктора для ЭИ и механизмом захвата и подач ЭИ составляет $h_{раб}$ = 30 мм.

При проведении данной операции ЭИ подрезается на 1,6 мм — величина, равная сумме глубины отверстия и калибровки. Вспомогательная операция подрезки необходима для устранения конусности ЭИ, возникающей в процессе прошивки отверстия и формирования выходного сечения отверстия. Расход ЭИ с учетом подрезки после прошивки каждого отверстия составлял 1,6 мм. Стандартного ЭИ рабочей длиной 300 мм (общая длина составляет 400 мм, 100 мм расстояние между деталью и механизмом захвата и подач ЭИ) хватает на обработку 187 отверстий.

При единовременной обработке массива отверстий по технологии Т2 вспомогательное время определяли как $t_{ув} + t_{рз}$.

Из данных табл. 4 следует, что штучно-калькуляционное время при обработке массива отверстий более чем в 16 раз ниже, чем при их последовательной обработке единичным электродом. При этом машинное время снижается более чем в 10 раз, вспомогательное — в 79 раз.

Для оценки эффективности рассчитывали скорость эрозии для условий аддитивного процесса:

$$v_{об.р} = 60 k_{эр} W_и f, \qquad (2)$$

где $k_{эр}$ — коэффициент эрозии, значение которого принято по данным работы [10].

Фактический коэффициент эффективности определяет выражение

$$k_{эф} = v_{об.эк}/v_{об.р}.$$

Полученные значения коэффициента эффективности представлены в табл. 3. При многоэлектродной обработке величина $k_{эф}$ в 2 раза больше, чем при обработке единичным электродом, что связано со значительным увеличением площади обработки. Вместе с тем значения $k_{эф}$, полученные при обработке единичным электродом, заметно ниже, чем полученные в работе [11] путем прямого подсчета относительной доли импульсов холостого хода и короткого замыкания. Это, очевидно, связано с тем, что в работе [11] из-за методических трудностей не учитывались импульсы разряда через газопаровые включения и твердые продукты эрозии, присутствующие в рабочей жидкости, которые играют значительную роль при обработке малых отверстий в условиях стесненного отвода продуктов эрозии из рабочей зоны.

Следовательно, при указанных в табл. 3 энергетических параметрах разрядного импульса, среднем диаметре лунки 100 мкм [12] и доле энергии, выделившейся на электроде, равной 0,4 [13], оценка средней плотности потока мощности в пятне контакта плазменного столба с поверхностью электрода дает значение $(0{,}5 \div 1{,}5)10^7$ Вт/см^2. Это означает, что практически весь объем лунки формиру-

ется в результате испарения, т. е. значение коэффициента эрозии, принятого в расчете по формуле (2), несколько завышено (не более чем в 1,5 раза).

Недостатком рассмотренной технологии является низкая стойкость многоэлектродного ЭИ (2 фильтр-элемента) и относительно высокие затраты на инструмент в калькуляции себестоимости. В большинстве случаев используют фильтр-элементы с отверстиями круглого сечения, поэтому был спроектирован и изготовлен сборный многоэлектродный ЭИ, конструкция и особенности применения которого рассмотрены в работе [15]. Сборка данного многоэлектродного инструмента для прошивки массива из 580 отверстий в фильтре составляет около 330 мин. Учитывая, что полезная длина электродов равна 300 мм, а величина его линейного износа принята равной 1,6 мм, одной сборкой стержней можно обработать 185 фильтров. Это существенно снижает затраты на инструмент.

Сравнение технико-экономической эффективности технологий осуществляли, анализируя изменяемые статьи затрат калькуляции технологической себестоимости [13]. Результаты приведены в табл. 5, где в балансе технологической себестоимости ($C_т$) основными затратами являются затраты на зарплату с начислениями ($C_{зп}$), амортизацию и ремонт оборудования ($C_{ар}$).

Расчеты выполнены при следующих исходных данных: нормативы ресурсопотребления относятся ко второму кварталу 2017 г., балансовая стоимость оборудования составляет 3 млн руб.; часовая тарифная ставка оператора электроэрозионного станка принята равной 300 руб/ч.

Таким образом, разработана и проанализирована технология прошивки массива отверстий малого диаметра с помощью многоэлектродного инструмента-электрода, обоснованы и апробированы параметры режима прошивки, обеспечивающие стабильный процесс и получение изделий, соответствующих техническим требованиям. Выполнены нормирование операций изготовления фильтр-элементов единичным и многоэлектродным инструментами, а также технико-экономические расчеты, которые показали, что при многоэлектродном варианте трудоемкость и себестоимость изготовления фильтр-элементов значительно ниже.

Таблица 5

Сравнительная оценка трудоемкости и себестоимости разных вариантов обработки

Вариант	$T_{ш.к}$, мин	$t_{оп}$, мин	$C_т$, руб.	$C_{зп}$, руб.	$C_{ар}$, руб.
Т1	928	891	9800	7440	2348
Т2	56	47	688	448	140
$K_{1/2}$	**16,6**	**19**	**14,2**	**16,6**	**16,8**

$K_{1/2}$ — Кратность показателей Т1 и Т2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Моргунов Ю. А., Полуянов В. С., Саушкин Б. П.** Анализ динамики и выявление тенденций развития наукоемких технологий машиностроения // Экономические стратегии. 2017. № 7 (149). С. 110—119.
2. **Саушкин Б. П., Моргунов Ю. А., Хомякова Н. В.** Физико-химические методы и технологии обработки. М.: Московский Политех, 2018. 108 с.
3. **Gruzdev A. A., Morgunov Yu. A., Saushkin B. P.** Tools for electrical-discarge hole drilling // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2018 // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. P. 1467—1473.
4. **Скоростная** электроэрозионная обработка пазов системы охлаждения жаровой трубы камеры сгорания / Д. М. Забельян, В. В. Рогов, Е. А. Митрюшин и др. // Металлообработка. 2012. № 3 (69). С. 14—19.
5. **Саушкин Б. П.** Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве // Металлообработка. 2003. № 1 (13). С. 8—17.
6. **A comparative** investigation on hybrid EDM for drilling small deep holes / Ni Hao, Hu Gong, Y. H. Dong // Int. J. Adv. Mamif. Technol. 2018. (95). P. 1465—1472.
7. **Kumar S., Grover S., Walia R. S.** Optimisation strategies in ultrasonic vibration assisted electrical discharge machining: a review // International Journal of Precision Technology. 2017. № 7. P. 51—84.
8. **Influence** of machining parameters on surface texture and material removal rate of Inconel 718 after electrical discharge machining assisted with ultrasonic vibration / R. Nowicki, R. Swiercz, D. Oniszczuk-Swiercz // AIP Conference Proceedings. 2017. 020019 (2018). Doi: 10.1063/1.5056282.
9. **Simulation** Study of Debris Removal Process in Ultrasonic Vibration Assisted Electrical Discharge Machining (EDM) of Deep Holes / Y.Liu, H. Chang, W. Zhang an. ot. // Micromachines. 2018. № 9. 378 p.
10. **Саушкин Б. П.** Электроэрозионная обработка: Состояние и перспективы развития. Ч. 2. Прошивка отверстий // Ритм машиностроения. 2012. № 9 (73). С. 20—24.
11. **Груздев А. А., Моргунов Ю. А., Саушкин Б. П.** Электроэрозионная прошивка отверстий малого диаметра при наложении ультразвука. 1. Результаты технологических экспериментов // Электронная обработка материалов. 2019. № 1 (55). С. 12—16.
12. **Груздев А. А., Моргунов Ю. А., Саушкин Б. П.** Особенности электроэрозионной обработки разрядными импульсами малых энергий // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. № 9 (75). С. 17—20.
13. **Электроэрозионная** обработка изделий авиационно-космической техники / Ю. С. Елисеев, Б. П. Саушкин; под ред. Б. П. Саушкина. М.: МГТУ им. Н. Баумана. 2010. 437 с.
14. **Пат. 2522864 Рос. Федерации:** Способ электроэрозионной прошивки отверстий.
15. **Пат. на полезную модель 170108 Рос. Федерации:** Многоэлектродный инструмент.

ve1219.fm Page 45 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 629.7.036.54

А. А. КОЗЛОВ, д-р техн. наук, И. Н. БОРОВИК, канд. техн. наук, А. А. ЕРМАШКЕВИЧ (МАИ — национальный исследовательский университет), В. П. ТАШЕВ, канд. техн. наук (НПО "Композит", г. Королев), Ш. Л. ГУСЕЙНОВ, д-р хим. наук, В. А. КОСЫХ, канд. техн. наук (ГНИИХТЭОС, г. Москва), e-mail: alex.ermashkevich@yandex.ru

Исследование процесса самовоспламенения топлива, состоящего из высококонцентрированной перекиси водорода, керосина и пирофорных добавок[1]

Исследована возможность создания экологически чистой самовоспламеняющейся топливной смеси для жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) на основе керосина с пирофорными добавками и окислителя — высококонцентрированного раствора перекиси водорода. Проведены эксперименты на самовоспламенение компонентов и огневые испытания в камере ЖРД малой тяги.

Ключевые слова: экологически чистое самовоспламеняющееся топливо, перекись водорода, керосин, пирофорные добавки, жидкостной ракетный двигатель малой тяги.

The possibility of creating an environmentally friendly self-igniting fuel mixture for a liquid-propellant rocket engine (LPRE) based on kerosene with pyrophoric additives and an oxidizing agent — a highly concentrated solution of hydrogen peroxide — was investigated. Experiments were carried out on the self-ignition of components and fire tests in the LPRE chamber of low-thrust.

Keywords: environmentally friendly self-igniting fuel, hydrogen peroxide, kerosene, pyrophoric additives, liquid-propellant small thrust engine.

Ракетно-космическая техника при эксплуатации негативно воздействует на окружающую среду:

проливы жидких компонентов топлива при транспортировке, заправке ракет и падении отделяемых ступеней;

тепловое и газовое загрязнение стартовых площадок;

разрушение озонового слоя Земли от выбрасываемых продуктов сгорания двигательных установок (ДУ) первой и второй ступеней;

засорение околоземного пространства отработавшими аппаратами и их фрагментами.

Во многом загрязнение окружающей среды зависит от используемого топлива и суммарного грузопотока. Поэтому необходим переход на экологически чистые топлива и многократное использование транспортных космических систем.

Одной из основных характеристик ракетного топлива является воспламеняемость при контакте окислителя и горючего, что особенно важно при импульсном режиме работы жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ). Все экологически чистые топлива не являются самовоспламеняющимися.

В табл. 1 и 2 приведены показатели эксплуатационных свойств экологически чистых топлив и их компонентов, которые используют в ЖРДМТ, работающих в импульсном режиме, а также значения приращения Δv скорости летательного аппарата (ЛА), которое определяется по формуле

$$\Delta v = I_{\text{у}} \ln\left(\frac{1}{1 - G_{\text{т}}/G_0}\right) - g\sin(\theta)\frac{G_{\text{т}}}{G_0}\frac{I_{sp}}{n_0}.$$

Здесь $I_{\text{у}}$ — удельный импульс, м/с; g — ускорение свободного падения; θ — угол местного тангажа; I_{sp} — продолжительность идеального вакуумного импульса, с; $n_0 = P/G_0$, где P — тяга ДУ; G_0 — стартовый вес ЛА; $G_{\text{т}}/G_0 = 0{,}845$ — среднее значение по трем разгонным блокам (Бриз-М, Фрегат, КВРБ), где $G_{\text{т}}$ — вес ЛА в конце траектории.

Данные для традиционного топлива АТ + НДМГ приведены для сравнения.

Сравнивая эксплуатационные показатели и результаты расчетов с учетом комплексных требований по экологичности, эффективности (плотность $\rho_{\text{т}}$ топлива и показатель Δv) и эксплуатационным свойствам ($T_{\text{к}}$ и др.) можно определить наиболее перспективное топливо для ЖРДМТ.

Криогенные компоненты ($O_{2ж}$, $CH_{4ж}$) требуют газификации для использования в качестве исполнительных органов реактивной системы управления (РСУ), что усложняет и утяжеляет ДУ. Наиболее долгохранимым и экологически чистым топливом остается топливо из высококонцентрированной перекиси водорода (ВПВ) и керосина (далее ВПВ + К), по эффективности незначительно уступающее токсичному топливу НДМГ + N_2O_4.

Сегодня очень важно найти замену токсичным ракетным топливам и разработать рецептуру экологически чистого самовоспламеняющегося компонента. Рассмотрим наиболее значимые работы в этом направлении.

В статье [1] представлен двухкомпонентный двигатель с тягой P = 500 Н, работающий на нетоксичном самовоспламеняющемся реактивном топливе. В качестве экологически чистого окислителя

[1] Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 13.7418.2017/8.9.

ve1219.fm Page 46 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Таблица 1

Показатели свойств экологически чистых топлив

Топливо	K_{m0}	K_m	$\rho_т$, кг/м^3	$I_у$, с	ρ_0, кг/м	$\rho_г$, кг/м^3	Δv, м/с
$O_{2г} + CH_{4г}$	4,000	3,600	834,7	401,60	1140	425	6620
$O_{2г} + C_{10}H_{20}$	3,400	3,060	1040,0	372,10	1140	820	6134
$O_{2г} + C_2H_6O$	2,087	1,873	987,6	315,96	1140	790	5009
$H_2O_2 + C_{10}H_{20}$	7,285	6,500	1294,0	336,88	1420	820	5553
$H_2O_2 + CH_4$	8,500	7,650	1024,0	344,50	1420	425	5678
$H_2O_2 + C_2H_6O$	4,434	4,000	1225,0	327,80	1420	790	5009
$N_2O_4 + (CH_3)_2N_2H_2$	3,060	2,754	1187,0	346,72	1442	790	5636

Примечание. K_{m0} — стехиометрическое соотношение топлива; K_m — соотношение компонентов топлива; $\rho_т$ — плотность топлива; $I_у$ — удельный импульс; ρ_0 — плотность окислителя; $\rho_г$ — плотность горючего; Δv — приращение скорости ЛА.

использовали раствор ВПВ. Самовоспламенение компонентов проверяли сбрасыванием капли окислителя на реактивные топлива разных составов.

Составы нетоксичных самовоспламеняющихся горючих:

$Stock_0$ — диметиловый эфир тетраэтиленгликоль, борогидрид натрия;

$Stock_1$ — диметиловый эфир тетраэтиленгликоль, тетрагидрофуран, борогидрид натрия;

$Stock_2$ — диметиловый эфир тетраэтиленгликоль, тетрагидрофуран, толуол, борогидрид натрия.

Огневые испытания проводили в течение 3,5 с. Было достигнуто самовоспламенение без использования внешней системы зажигания и формирование стабильной струи продуктов сгорания. Эксперименты показали, что лучшие показатели у реактивной топливной смеси $Stock_2$.

Техническая характеристика двигателя, работающего на топливе $Stock_2$

Окислитель	90 %-й раствор H_2O_2
Проектная тяга P, Н	500
Расчетное давление в камере сгорания (КС), бар	30
Идеальный импульс в вакууме I_{sp}, с	306,5
Характеристическая скорость C^*, м/с	1579,2
Теоретическое соотношение окислителя и горючего (О:Г)	5,48
Теоретический расход топлива, г/с	24
Теоретический расход окислителя, г/с	131,4
Расход топлива, г/с	23,2
Расход окислителя, г/с	129,9
Амплитуда пульсаций давления в КС, %	±7,69

В работе [2] особое внимание уделяли экспериментальному исследованию разных топливных присадок к 98 %-му раствору перекиси водорода. В работе использовали следующие комбинации топлив и добавок:

метанол + 10 % тетрагидрат ацетата марганца;
метанол + 30 % тетрагидрат ацетата марганца;
этаноламин + 5 % $CuCl_2$;
этаноламин +10 % $CuCl_2$;
этаноламин + 10 % $CuCl_2$;
этаноламин при 40 °С + 10 % $CuCl_2$;
керосин + соли металлов;
диметилгексан + $C_{16}H_{30}CoO_4$;
диметилбутиламин + $C_{16}H_{30}CoO_4$;
триглим + 8 % H_4BNa;
тетраглим +10 % H_4BNa;
диметилформамид + 12 % H_4BNa;
диметилсульфоксид + 10 % H_4BNa;
триглим + 8 % H_4BNa;
диметилформамид + 12 % H_4BNa;
диметилсульфоксид + 10 % H_4BNa.

Были отобраны комбинации топлив, характеризующиеся достаточным самовоспламенением с 98 %-ым раствором перекиси водорода и обладающие наиболее перспективными показателями (простота хранения, удельный импульс, диапазон рабочих температур, токсичность и т. д.). Испытания на самовоспламенение проводили сбрасыванием капли в открытый сосуд. Результаты испытаний по задержке зажигания приведены в табл. 3. Наиболее перспективной композицией принята смесь из диметилацетамида и этаноламина.

В статье [3] исследована возможность создания комбинации топлива из ВПВ и нетоксичного самовоспламеняющегося горючего (НСВГ).

Исследуемые НСВГ состояли из трех компонентов:

углеводородного топлива — основной компонент, полученный из авиационного керосина китайского производства (стандарт № 3) или ракетного керосина;

соли переходного металла, которая реагирует с образованием катализатора, растворимого в керосине;

органической добавки, которая хорошо смешивается с катализатором и керосином.

Таблица 2

Показатели свойств компонентов топлива

Компонента	$T_{кр}$, °С	$T_к$, К	$p_{кр}$, МПа
O_2	−218,8	90,0	5,014
H_2O_2	457,0	423,3	21,400
CH_4	−82,1	112,0	4,580
N_2O_4	158,2	294,3	9,996

Примечание. $T_{кр}$ — критическая температура; $T_к$ — температура кипения; $p_{кр}$ — критическое давление.

Созданный комплекс был легко смешиваемым, что позволило сделать горючее однородным.

Исследуемые ВПВ имели концентрацию 90 и 96 %.

Предварительную оценку активности топлив проводили в тесте с открытым сосудом с использованием 96 %-го раствора H_2O_2. Сначала небольшое количество H_2O_2 наносили на пластину из коррозионно-стойкой стали. Затем к H_2O_2 добавляли каплю горючей смеси. Топливные смеси, которые самовоспламенялись без задержки, считались перспективными для испытаний в двигателях.

Для исследования показателей процесса горения проводили испытания в КС. К керосину добавляли небольшое количество солей: Mn (II), Mn (III), Co (II), Co (III), Fe (III). Было установлено, что соли Mn (II), Mn (III) и Co (II) проявляют очень высокую активность по воспламенению. Во всех образцах наблюдалось разложение, но зажигания не происходило. Поэтому следующей задачей стал выбор добавок для повышения совместимости катализаторов и керосина.

В качестве органических добавок выбрали соединения спиртов, аминов и ароматических углеводородов. С добавлением данных органических добавок были изготовлены гомогенные топлива, содержащие определенное количество солей Mn (II), Mn (III) и Co (II) отдельно или в комбинации.

Тесты по сбрасыванию капли горючего в открытую чашу (табл. 4) показали, что можно получить самовоспламеняющийся керосин с перекисью водорода высокой концентрации.

В работе [4] исследовали углеводородные самовоспламеняющиеся керосиновые горючие с использованием в качестве окислителя ВПВ. Изучали задержку воспламенения и стабильность при хранении компонентов с добавками. Полученное самовоспламеняющееся горючее характеризовалось низкой токсичностью, при работе с ВПВ образовывалась нетоксичная самовоспламеняющаяся смесь. Компоненты топлива предварительно испытывали на самовоспламенение сбрасыванием капли в открытую чашу.

Огневые испытания проводили на ЖРДМТ с тягой 30 Н, давление в КС составляло 0,6 и 1 МПа при соотношениях компонентов соответственно K_m = 3,66 и 5,74. Стабильное горение получено при использовании горючего на основе авиационного керосина и 98 %-го раствора перекиси водорода (табл. 5). Аналогичные результаты получены и для 90 %-го раствора перекиси водорода, но наблюдалось более длительное зажигание.

На двух ЖРДМТ была обеспечена надежная работа в импульсном режиме. В качестве окислителя использовали 90 %-й раствор H_2O_2 несмотря на его низкую активность. При интервале импульсов 50 мс в первом импульсе было достигнуто стабильное распределение давления в КС, на более поздних импульсах проявлялись пульсации давления с периодом 20 мкс. При интервале импульсов 30 мс в первом импульсе возник небольшой скачок давления (≈8 %), затем давление в камере восстановилось.

Для топлива ВПВ + К известны два способа воспламенения: электроискровой и предварительное разложение ВПВ на катализаторе с последующим впрыском керосина в горячие продукты разложения [5, 6]. Для воспламенения жидких керосина и кислорода в маршевых двигателях (РД-170, 11Д57, Merlin 1D и др.) используют пусковое горючее (ПГ) — смесь $(C_2H_5)_3Al + (C_2H_5)_3B$. Одноразо-

Таблица 3

Время задержки самовоспламенения разных горючих при сбрасывании капли в открытый сосуд

Горючее	Добавка	Время задержки, мс
Диметилацетамид, этаноламин	H_4BNa	14
Этаноламин, пиперидин (1:1)	H_4BNa	12
Морфолин, этаноламин	H_4BNa	10
Этаноламин	H_4BNa	14
Этаноламин	$CuCl_2$	16
Монометилгидразин, азотный тетраксид	—	< 3

Таблица 4

Тесты на самовоспламенение разных горючих в открытой чаше

Горючее	Активный металл	Результат
522-4	Mn (III)	Мгновенное зажигание, пламя стабильное, громкий звук
522-9	Mn (III)	Быстрая реакция, затем зажигается с небольшой задержкой времени
614-3	Co (II)	
614-4	Co (II)	Быстрая реакция, мгновенное зажигание
614-6	Co (II)	
614-8	Co (II)	Быстрая реакция, затем зажигается с небольшой задержкой времени
630-1	Mn (III) + Co (II)	
109-17	Mn (III) + Co (II)	Мгновенное зажигание, пламя стабильное
108-7	Mn (II) + Co (II)	Быстрая реакция, затем зажигается с небольшой задержкой времени
1010-26	Mn (III) + Co (II)	Мгновенное зажигание, громкий звук

Таблица 5

Результаты испытаний на зажигание топлив в двигателе с тягой 30 Н

Расход H_2O_2, г/с	Расход горючего, г/с	T_0, мс	T_{90}, мс	$p_к$, МПа	$\Delta p_к$, %
15,7	2,40	37	69	0,8	±5,6
15,6		35	78		±6,2
15,7		36	81		±5,6
16,0	2,75	43	82		±10
16,0	2,75	41	81		±6,8

Примечание. T_0 — время задержки воспламенения; T_{90} — время достижения 90 % давления от максимального в КС; $p_к$ — давление в КС; $\Delta p_к$ — амплитуда пульсаций давления в КС.

ve1219.fm Page 48 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

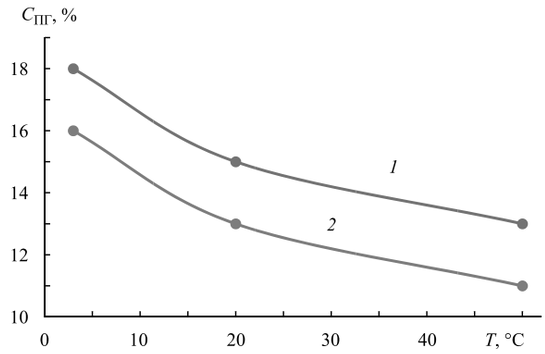


Рис. 1. Верхняя (*1*) и нижняя (*2*) границы процентного содержания *C* добавки ПГ в 84,5 %-й раствор H_2O_2 для самовоспламенения топлива при изменении температуры *T*

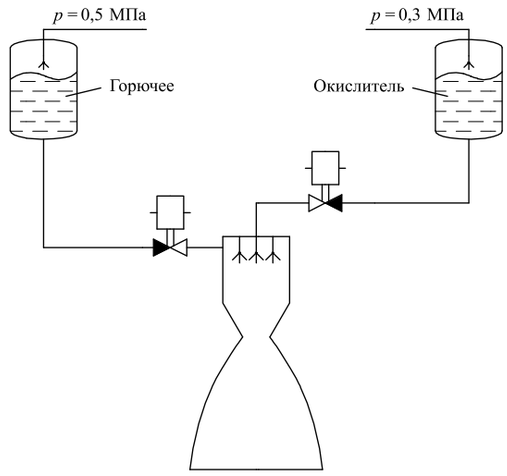


Рис. 2. Схема огневого стенда (ГНИИХТЭОС)

вый пуск предусматривает размещение ампулы ПГ на одноименной магистрали перед КС и газогенератором. Для двигателей многократного пуска требуется вытеснительная система подачи ПГ. Использование ПГ для воспламенения основных компонентов топлива усложняет систему питания ДУ и не годится для импульсного режима работы ЖРДМТ.

В работе [7] рассмотрена возможность реализации воспламенения топлива ВПВ + К в результате добавки к керосину 3 % ацетилацетоната марганца $[Mn(C_5H_7O_2)_3]$. Для растворения порошкообразного ацетилацетоната в керосине его предварительно растворили в ксилидине. Однако при хранении на свету ацетилацетонат марганца выделяется из раствора в виде мелких кристаллов и под действием гравитации оседает на дно емкости.

Пусковое горючее двигателей РД-170, 11Д57, Merlin 1D обеспечивает надежное воспламенение при контакте с газообразным кислородом. Можно предположить, что добавки ПГ к керосину обеспечат его воспламенение при контакте с ВПВ даже при ее частичном разложении и выделении реакционно-активного кислорода.

Результаты термодинамического расчета топлива К + ПГ + ВПВ представлены в табл. 6.

В МАИ на кафедре "Ракетные двигатели" были проведены лабораторные эксперименты по смешиванию ВПВ и керосина с добавками ПГ, которое осуществлялось впрыском керосина (1 см^3) с помощью медицинского шприца в керамическую кювету с 84,5 %-ым ВПВ (2 см^3).

При струйном смешивании надежное воспламенение достигалось, если концентрация ПГ превышала 13 %. При повышении температуры концентрация ПГ для воспламенения снижалась [8] (рис. 1).

Термодинамические расчеты показали, что добавки ПГ не снижают удельный импульс топлива (см. табл. 6). Кроме того, хранение смеси из керосина и ПГ в течение месяца не влияет на воспламенение.

При использовании 93 %-го ВПВ в ряде экспериментов реализовывалось детонационное горение, сопровождавшееся сильной ударной волной. Поэтому эксперименты перенесли на огневой стенд с автоматизированной подачей компонентов.

Схема установки представлена на рис. 2.

Рабочий участок стенда позволял осуществить внедрение керосиновой струи в жидкую ВПВ и встречу распыленных в центробежных форсунках компонентов. Кроме того, для получения полной картины воспламенения распыленных компонентов воспламенение создавали в инертной газовой среде, в среде газообразного кислорода и глубокого разряжения. Процессы смешивания и воспламенения фиксировали видеокамерой.

Таблица 6

Результаты термодинамического расчета топлива К + ПГ и ВПВ

$C_{ПГ}$, % $[(C_2H_5)_3Al]$	$T_к$, К	$\mu_к$	$I_у$, с	$K_т$	$R_г$, Дж/(кг · К)	H, Дж/(кг · К)	$\bar{F}$	$p_к$, МПа
5 10 15	2558 2562 2566	21,4	207,39 207,50 207,72	7,378 7,307 7,190	388,5	−6461,92 −6454,57 −6446,57	1,5	1,47
100	2654	21,2	210,80	5,834	392,2	−6299,75		
Керосин RP-1	**2552**	**21,4**	**207,22**	**7,448**	**388,5**	**−6466,49**		

Примечание. $C_{ПГ}$ — концентрация пускового горючего; $T_к$ — температура в КС; $\mu_к$ — молярная масса смеси продуктов сгорания компонентов топлива в КС; $I_у$ — удельный импульс; $K_т$ — соотношение компонентов топлива; $R_г$ — газовая постоянная смеси продуктов сгорания; H — энтальпия топлива; $\bar{F}$ — степень расширения сопла; $p_к$ — давление в КС.

ve1219.fm Page 49 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Как показали эксперименты, при одной и той же концентрации ПГ ($C_{ПГ}$ = 15 %) в азотной газовой среде воспламенения не происходит, в кислородной среде реализуется надежное воспламенение. При распыливании компонентов в центробежных форсунках удалось получить надежное воспламенение на воздухе при $C_{ПГ}$ = 12 %, а в кислородной среде — при $C_{ПГ}$ = 9 %.

Для приближения условий воспламенения к реальным использовали ЖРДМТ 123-01 с тягой 50 Н (разработан в ТМКБ "Союз"), работающего на АТ + НДМГ. Смесительная головка двигателя имеет одну центральную окислительную однокомпонентную центробежную и пять периферийных однокомпонентных центробежных форсунок для горючего (рис. 3, 4).

Двигатель испытывали аналогично вышеприведенной технологии. Схема стенда представлена на рис. 5.

Первый пуск реализовали на смесительной головке при концентрации пирофорной добавки C = 15 %, воспламенения не произошло. Это можно объяснить несфокусированной встречей конусов распыла форсунок окислителя и горючего в свободном воздушном объеме. Второй пуск с присоединенной КС закончился детонационным горением и разрушением подводящей магистрали окислителя. В настоящее время эксперименты на стенде ГНИИХТЭОС продолжаются для выяснения условий возникновения и устранения детонационного режима горения при воспламенении и снижения процентного содержания ПГ в керосине конструктивными решениями для смесительной головки и катализационного покрытия элементов конструкции КС.

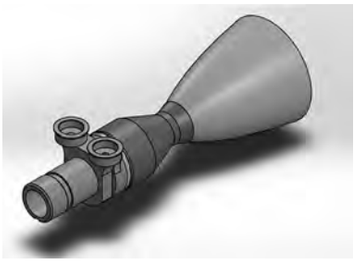


Рис. 3. ЖРДМТ 123

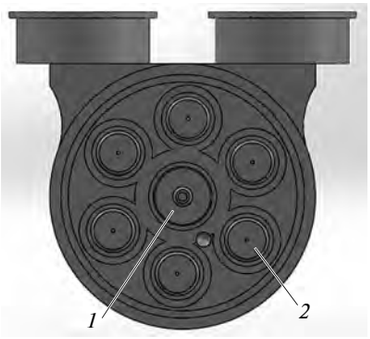


Рис. 4. Смесительная головка:

1 — центральная форсунка окислителя; *2* — периферийные форсунки горючего

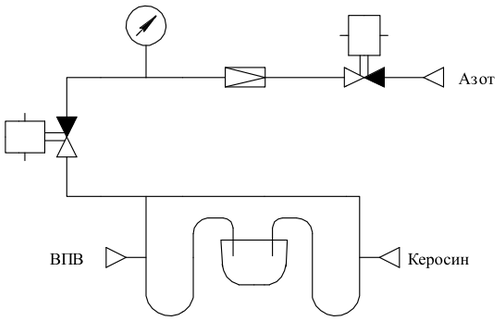


Рис. 5. Схема ПГС рабочего участка стенда для исследования процесса самовоспламенения

Таким образом, испытания в открытом сосуде и огневые испытания в КС показали, что, используя ВПВ (90÷98 %) в качестве окислителя и керосин с пирофорными добавками, можно изготовить самовоспламеняющееся топливо. Нетоксичное самовоспламеняющееся топливо на основе ВПВ + К с пирофорными добавками перспективно и может заменить используемое в настоящее время токсичное самовоспламеняющееся топливо.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Hongjae K., Dongwook J., Sejin K.** Demonstration of 500 N scale bipropellant thruster using non-toxic hypergolic fuel and hydrogen peroxide // Aerospace Science and Technology. 2016. Vol. 49. C. 209—214.

2. **Rarata G., Wojciech F.** Assessment of various fuel additives for reliable hypergolic ignition with 98 % + HTP // The 66th International Astronautically Congress. Jerusalem. 2015. C. 91—99.

3. **Propulsive** Performance of a Hypergolic H_2O_2 / Yu Cong, Tao Zhang, Tao Li an.ot. // Kerosene Bipropellant. Journal of Propulsion and power. 2004. Vol. 20. N. 1. C. 83—86.

4. **Study** of kerosene based fuel with hydrogen peroxide for hypergolic application / Yu Cong, Tao Zhang, Herui Dou an. ot. // The 2th Int. Conference on Green Propellants for Space Propulsion. Cagliari. Sardinia. Italy. 2004.

5. **Development** of ignition systems for 200 and 500 N thrusts with ecologically — clean propellants 94 — percent HTHP + kerosene and oxygen (gas) + kerosene / Kozlov A. A., Vorobiev A. G., Borovik I. N. an. ot. // The 60th International Astronautically Congress. Daejeon. 2009. C. 30—36.

6. **Ташев В. П.** Углеводородное горючее на основе керосина с присадками для повышения энергетической эффективности ЖРД / Дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ. 2014. 115 с.

7. **Investigation** of the working process in liquid rocket engine of small thrust at high concentration hydrogen peroxide with kerosene or alcohol with catalyst / Kozlov A. A., Abashev V. M., Mordovin V. Z. an. ot. // Chinese—Russian—Ukrainian workshop on space propulsion. Xian. China. 2002. 17—19 September.

8. **Ульман Э.** Разработка нового самовоспламеняющегося топлива на базе перекиси водорода и керосина с пирофорными добавками. М.: МАИ, 2013. 114 с.

ve1219.fm Page 50 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 621.98.044.7:621.757.002

И. А. БЕЛЯЕВА, В. А. ГЛУЩЕНКОВ, канд. техн. наук (Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева), e-mail: vgl@ssau.ru

Гибридные и комбинированные технологии статического и магнитно-импульсного нагружения в листоштамповочном производстве

Рассматриваются новые гибридные и комбинированные технологии для листоштамповочного производства, сочетающие одновременное воздействие на заготовки статического и магнитно-импульсного нагружений. Технологии основаны на встраивании в инструментальные штампы индукторов, соединенных с магнитно-импульсной установкой. Приведена конструкция штампа для операции "вытяжка—обрезка припуска", для проектирования которого исходные данные получены компьютерным моделированием статико-динамических процессов операций фальцовки и рельефной формовки.

Ключевые слова: гибридные и комбинированные технологии, магнитно-импульсное воздействие, моделирование, статико-динамические процессы, инструментальный штамп, индуктор.

New hybrid and combined technologies are considered for sheet stamping production, combining the simultaneous effect of static and magnetic-pulse loadings on billets. The technologies are based on embedding of inductors connected to a magnetic pulse installation in tool stamps. The design of the stamp for the "drawing-trimming allowance" operation is presented, for the design of which the initial data were obtained by computer simulation of the static-dynamic processes of folding and bulge forming.

Keywords: hybrid and combined technologies, magnetic-pulse impact, modeling, static-dynamic processes, tool stamp, inductor.

В листоштамповочном производстве двигателестроения широко используют инструментальные штампы для разделительных, формообразующих и сборочных (с использованием пластического деформирования) операций, традиционно реализуемых при статическом нагружении [1—3]. В последнее время применяют специальные высокоэнергетические методы штамповки с динамическими нагрузками [4], имеющие ряд специфических преимуществ. Авторы предлагают объединить оба вида нагружения (статическое и динамическое) и использовать их преимущества в предложенных гибридных или комбинированных операциях [5].

В предлагаемых операциях на заготовку воздействуют одновременно двумя и более источниками нагружения за один производственный цикл. Циклограммы таких процессов приведены на рис. 1. В качестве динамического нагружения использовали бесконтактное воздействие на заготовку импульсным магнитным полем (ИМП). В таблице в качестве примера приведены схемы, например таких операций, как "вытяжка—обрезка припуска", "вытяжка—формовка", "фальцовка" и "гибка". Все операции стали возможными благодаря использованию в конструкциях инструментальных штампов индукторов [6], соединенных с магнитно-импульсной установкой [7].

Так, при вытяжке полых деталей на заключительном этапе осуществляется магнитно-импульсная обрезка припуска, которая длится тысячные доли секунды, что несоизмеримо меньше времени вытяжки и позволяет не останавливать пресс. Таким образом, за один ход пресса осуществляются две операции: вытяжка и обрезка припуска, что обеспечивается размещением индуктора на пуансоне.

Отличительная особенность операции "вытяжка—формовка" — размещение индуктора в матрице. Здесь на заключительном этапе вытяжки формируются ребра жесткости.

Формирование фланца осуществляется в два этапа: статический — гибка—формовка борта на 90°, и импульсный — окончательное деформирование на угол 180°. Аналогичной является технологическая схема статико-динамического процесса гибки хомутов. Приведенные технологические схемы опробованы в лабораторных условиях. На рис. 2 приведены конструктивная схема, внешний вид и пуансон с индуктором штампа для вытяжки и обрезки припуска.

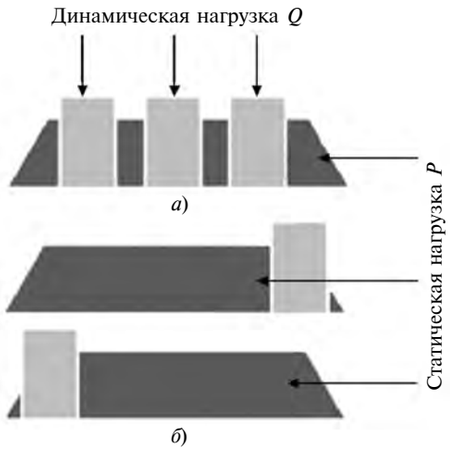


Рис. 1. Циклограммы гибридного (*а*) и комбинированного (*б*) процессов

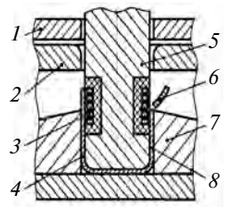
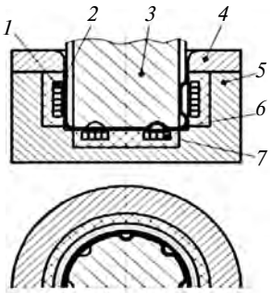
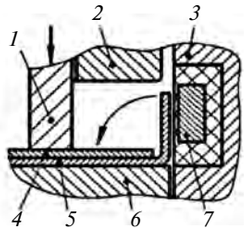
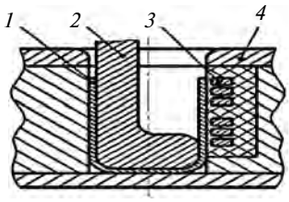
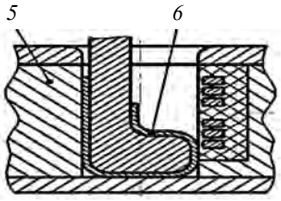
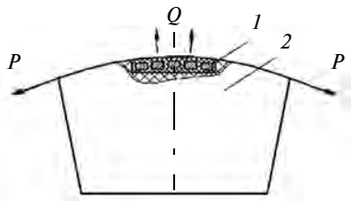
ve1219.fm Page 51 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Проектирование штампа и определение режимов деформирования основаны на результатах компьютерного моделирования с использованием специально разработанной методики [8]. Блок-схема последовательности компьютерного моделирования статико-динамических процессов приведена на рис. 3. Начальным условием динамического этапа является напряженно-деформированное состояние (НДС) материала заготовки на предыдущем шаге статического деформирования (операция рестарт). При этом свойства металла меняются со статических на динамические.

Компьютерное моделирование позволило выбрать оптимальное взаимное расположение индуктора и матрицы, энергетическое условие заполнения рельефа, выявить опасные участки деформируемого металла и т. д. Опробованные в лабораторных условиях технологии подтвердили возможность их осуществления и позволили оценить технико-экономическую эффективность разрабатываемых процессов:

1) повышение качества готовой продукции при использовании динамической нагрузки и особенностей высокоскоростного деформирования;

Схемы гибридных и комбинированных технологий

Технологическая схема	Основные элементы инструментального штампа	Готовая продукция
	Комбинированные технологии	
	**Вытяжка—обрезка припуска** *1* — прижим; *2* — вытяжная матрица; *3* — встроенный индуктор; *4* — заготовка после вытяжки; *5* — пуансон; *6* — обрезанный припуск; *7* — обрезная матрица; *8* — готовая деталь	
	**Вытяжка—формовка** *1* — цилиндрический индуктор; *2* — заготовка после вытяжки; *3* — пуансон; *4* — вытяжная матрица; *5* — корпус; *6* — готовая деталь; *7* — плоский индуктор	
	**Фальцовка** *1* — прижим; *2* — пуансон; *3* — матрица; *4* — внутренняя панель; *5* — внешняя панель; *6* — выталкиватель; *7* — индуктор	
	**Гибка** *1* — заготовка; *2* — пуансон; *3* — плоский индуктор; *4* — матрица; *5* — корпус; *6* — готовая деталь	
	Гибридная технология	
	**Обтяжка** *1* — индуктор; *2* — обтяжной пуансон	

ve1219.fm Page 52 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

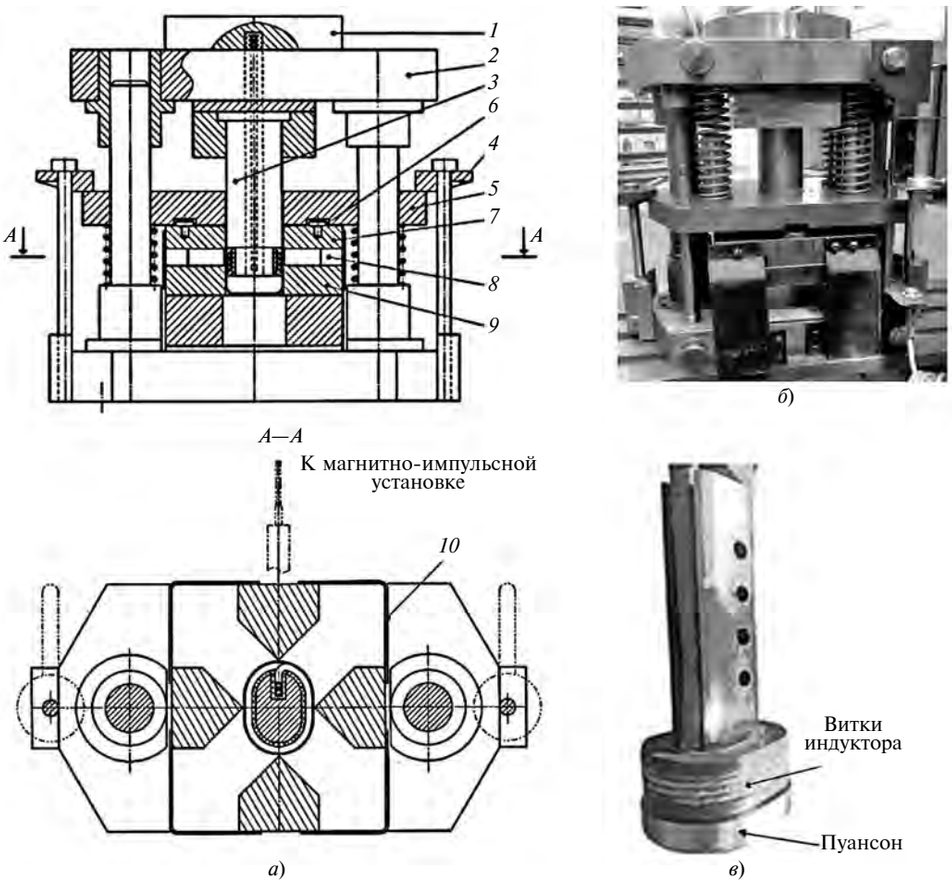


Рис. 2. Конструктивная схема (*а*), внешний вид (*б*) и пуансон с индуктором (*в*) штампа для комбинированной технологии "вытяжка—обрезка припуска":

1 — подпятник; *2* — верхняя плита; *3* — пуансон; *4* — зажим с рукояткой; *5* — прижим заготовки; *6* — грибок (4 шт.); *7* — вытяжная матрица; *8* — ножи для разрезки отхода; *9* — обрезная матрица; *10* — ограждение

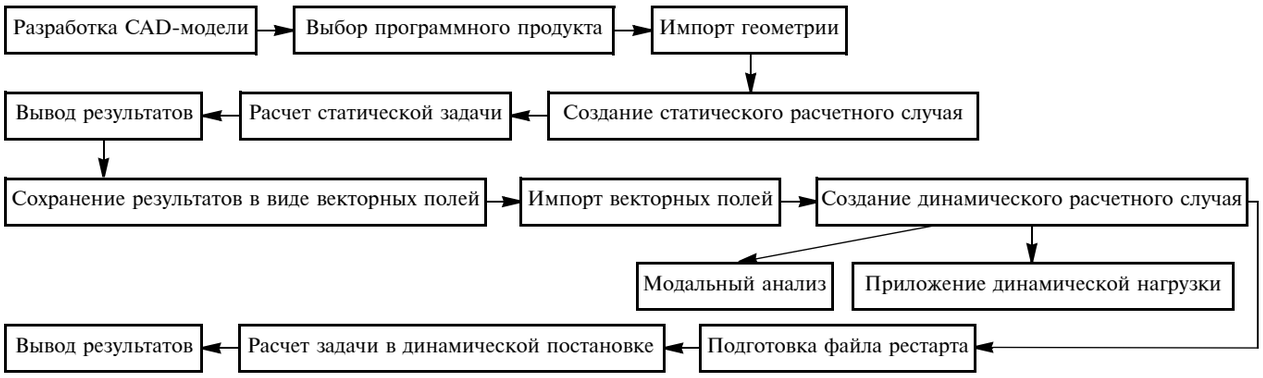


Рис. 3. Блок-схема комбинированного расчетного случая

2) сокращение производственного цикла за счет выполнения двух операций за один рабочий ход пресса;

3) уменьшение количества штамповой оснастки, упрощение ее конструкции, ликвидацию подвижных элементов, осуществлявших перпендикулярную деформацию по отношению к главной осевой деформации.

Выводы

1. Разработаны технологические схемы гибридных и комбинированных технологий, сочетающие статическое и магнитно-импульсное нагружения, реализуемые путем размещения в технологической оснастке индукторов, соединенных с магнитно-импульсной установкой.

ve1219.fm Page 53 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 621.983.3:658.512.011.56.004

В. А. ЖАРКОВ, д-р техн. наук (г. Москва), e-mail: dr_zharkov_v_a@mail.ru

Гибка листов и профилей на четырехвалковой машине для корпусов ракет, трубных и каркасных изделий. Часть 2

Разработана теория и формулы для расчета параметров деформированно-напряженного состояния с учетом упрочнения заготовки при подгибке и калибровке ее кромки на валковой машине и пружинения кромки после калибровки. CAD/CAE-моделированием исследована динамика калибровки и рассчитаны деформации, напряжения и силы, действующие на заготовку от валков. Определены критерии вероятности образования трещин, низкой точности размеров и чрезмерного пружинения заготовки после калибровки. Даны рекомендации по устранению этих дефектов.

Ключевые слова: листовая штамповка, гибка, валковая машина, теория гибки, подгибка, калибровка, кромка заготовки, CAD/CAE-моделирование.

A theory and formulas are developed for calculating the parameters of the deformed-stressed state, taking into account the strengthening of the billet during pre-bending and calibration of its edge on a roller machine and springing of the edge after calibration. By CAD / CAE modeling the dynamics of calibration is investigated and the deformations, stresses and forces acting on the billet from the rolls are calculated. The criteria for the probability of cracking, low dimensional accuracy and excessive springing of the billet after calibration are determined. Recommendations are given for eliminating these defects.

Keywords: sheet stamping, bending, roll machine, bending theory, pre-bending, calibration, billet edge, CAD/CAE modeling.

В ракето- и самолетостроении при производстве труб, каркасов, изделий химического и нефтегазового машиностроения цилиндрические и конические обечайки, корпуса и детали изготовляют гибкой листовых и профильных заготовок на трех- и четырехвалковых машинах по ГОСТ 10664—82. Сначала рассмотрим задачи, решаемые при наиболее распространенной гибке листа на четырехвалковой машине.

Подгибка кромки заготовки

На рис. 1 показаны этапы подгибки и калибровки кромки заготовки на четырехвалковой машине с верхним *1* и нижним *2* приводными валками, левым *3* и правым *4* неприводными валками, симметрично расположенными относительно вертикальной плоскости *YZ* симметрии машины (вид спереди по оси *Z*, направленной на читателя), самой распространенной детали — замкнутого цилиндра *9* с наружным диаметром *D* (радиус *R*) и осью, проходящей через центр O_b, за один проход заготовки *5*, изготовленной из листа толщиной *s* (ось *Y*), длиной l_b (ось *X*) и шириной *b* (ось *Z*) [1].

На этапе подгибки заготовки *5* из начального положения до положения *5′* на угол α (см. рис. 1, *а*) подъем бокового валка с радиусом R_3 из центра O_3 (X_{O_3}, Y_{O_3}) в центр O'_3 (X'_{O_3}, Y'_{O_3}), когда валок

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 50)

2. Создана методика компьютерного моделирования статико-динамических процессов, опробованная на операциях формовки рельефа и фальцовки, позволившая получить исходные данные для проектирования технологии и оснастки.

3. Приведены результаты опробования новых технологий в лабораторных условиях и оценка их технико-экономической эффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Романовский В. П.** Справочник по холодной штамповке: 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.

2. **Зубцов М. Е.** Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980. 432 с.

3. **Справочник:** В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1985—1987. 544 с.

4. **Глущенков В. А., Карпухин В. Ф.** Технология магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: Издательский дом "Федоров", 2014. 193 с.

5. **Glushchenkov V., Belyaeva I.** Technological schemes of hybrid and combined technologies using static and dynamic loads // Key Engineering Materials. 2017. V. 746 KEM. P. 246—254.

6. **Глущенков В. А.** Индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: ООО «Изд-во "Учебная литература"», 2013. 148 с.

7. **Юсупов Р. Ю., Глущенков В. А.** Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: Издательский дом "Федоров", 2013. 123 с.

8. **Глущенков В. А., Беляева И. А.** Последовательность компьютерного моделирования комбинированных (статико-динамических) технологий машиностроения // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4. С. 7—81.

ve1219.fm Page 54 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

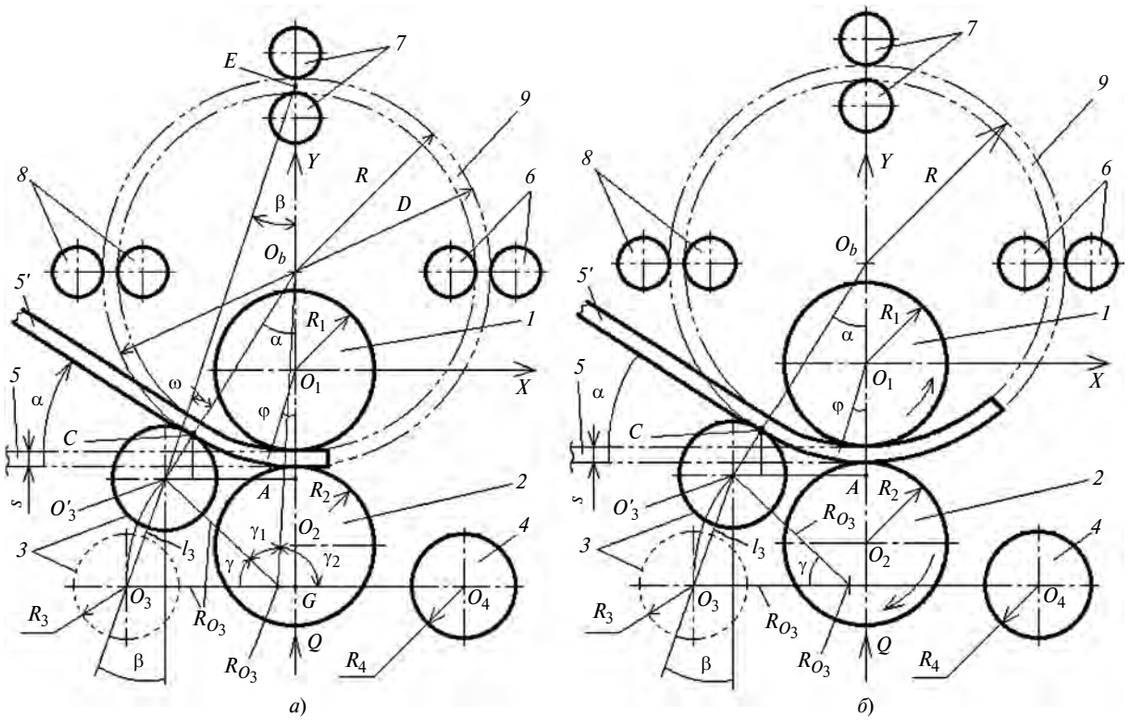


Рис. 1. Схемы подгибки (*а*) и калибровки (*б*) кромки заготовки на четырехвалковой машине:
1 — верхний валок; *2* — нижний валок; *3* и *4* — боковые левый и правый валки; *5* — заготовка до подгибки; *5′* — заготовка после подгибки кромки; *6—8* — опорные ролики; *9* — изогнутая деталь

касается поверхности детали в точке *C*, на разных машинах осуществляется по-разному: вариант 1 — поворотом валка на угол γ от горизонтали O_3O_4 с помощью рычага $O_3O_{RO_3}$ по дуге окружности радиуса R_{O_3} с точкой опоры O_{RO_3} (X_{ORO_3}, Y_{ORO_3}) в виде оси на станине машины; вариант 2 — перемещением валка *3* (или *4*) по прямой $O_3O'_3 = l_3$, наклонной к вертикали под углом β.

Для варианта 1 для определения неизвестных α и γ (остальные величины являются параметрами машины) получены формулы [1]:

$$O_bO'_3 = R + R_3 = a_1;$$
$$O_{RO_3}O'_3 = R_{O_3} = b_1;$$
$$O_bO_{RO_3} = c_1 = \sqrt{(X_{O_b} - X_{ORO_3})^2 + (Y_{O_b} - Y_{ORO_3})^2};$$
$$X_{O_b} = 0;\ Y_{O_b} = R - R_1 - s;\ p_1 = (a_1 + b_1 + c_1)/2;$$
$$r_1 = \sqrt{[(p_1 - a_1)(p_1 - b_1)(p_1 - c_1)]/p_1};$$
$$\gamma_1 = 2\mathrm{arctg}[r_1/(p_1 - a_1)];$$
$$\gamma_2 = 90 - \arccos[(R - R_1 - s + |Y_{ORO_3}|)/c_1];$$
$$\gamma = 180 - \gamma_1 - \gamma_2;$$
$$\alpha = \arcsin[(|X_{ORO_3}| + R_{O_3}\cos\gamma)/(R + R_3)]. \quad (1)$$

Для варианта 2 для определения неизвестных α и l_3 получены формулы:

$$EO_1 = a = |X_{O_3}|/\mathrm{tg}\beta - |Y_{O_3}|;$$
$$O_bO'_3 = a_2 = R + R_3;\quad O_bE = b_2 = a + R_1 + s - R;$$
$$\sin\omega = \sin(\alpha - \beta) = b_2\sin\beta/a_2;$$
$$\alpha = \beta + \arcsin[(a + R_1 + s - R)\sin\beta/(R + R_3)];$$
$$l_3 = [|X_{O_3}| - (R + R_3)\sin\alpha]/\sin\beta. \quad (2)$$

На этапе подгибки для элементов, перешедших в пластическое состояние по всей толщине заготовки на участке I [1], который контактирует с верхним валком, решаем совместно уравнение равновесия $d\sigma_r/dr + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r = 0$ и уравнение пластичности $\sigma_r - \sigma_\theta = \pm\sigma_s$ для зон растяжения (в последнем уравнении со знаком минус) и сжатия по толщине, используя для определения постоянной интегрирования граничные условия, по которым для зоны растяжения на наружной поверхности заготовки при $r = R'_1 = R_1 + s$ и для зоны сжатия на внутренней поверхности заготовки при $r = R_1$ радиальное напряжение составит $\sigma_r = 0$ при условии, что контактное напряжение σ_k между заготовкой и валком *1* составляет $\sigma_k \approx 0$. Получим распределение напряжений σ_r и σ_θ по толщине *s* заготовки: в зоне растяжения ($r_n < r \le R'_1$): $\sigma'_r = -\sigma_s\ln(R'_1/r)$,

$\sigma'_\theta = \sigma_s[1 - \ln(R'_1/r)]$, в зоне сжатия ($R_1 \le r < r_n$): $\sigma''_r = -\sigma_s \ln(r/R_1)$, $\sigma''_\theta = -\sigma_s[1 + \ln(r/R_1)]$. Приравняв напряжение σ_r зон растяжения и сжатия, получим радиус нейтрального слоя: $r_n = \sqrt{R_1(R_1 + s)}$, который смещен от срединного слоя радиуса $r_{\text{ср}} = (R_1 + R'_1)/2 = R_1 + s/2$ к внутренней поверхности заготовки. На внеконтактном участке II радиус нейтрального слоя составляет $r_n = (E/\sigma_s)s/2$, где E — модуль упругости по ГОСТ 1497—84.

В конце подгибки внутренняя поверхность участка I является цилиндрической поверхностью радиуса R_1, который меньше радиуса ($R - s$) штампуемой детали, а поверхность участка II имеет радиус R'_{II}, который значительно больше ($R - s$); обе поверхности сопряжены в точке N. И только на этапе калибровки после вращения верхнего и нижнего валков в результате перемещения заготовки с пластическим изгибом и разгрузкой на выходе получают участок, близкий к поверхности детали радиуса ($R - s$).

Калибровка изогнутой кромки заготовки

После подгибки (см. рис. 1, *а*) вращением приводных валков *1* и *2* перемещают и одновременно калибруют изогнутый участок заготовки на небольшое расстояние за валки *1* и *2*, останавливают гибку (см. рис. 1, *б*) и по шаблону проверяют получение требуемой кривизны этого участка. Длина откалиброванного участка заготовки примерно равна длине изогнутой кромки после подгибки. При калибровке устраняются искажения формы, полученные при подгибке, повышается точность размеров, и уменьшается шероховатость поверхности участка. Но если точность недостаточная, то повысить ее можно дополнительным изгибом или спрямлением, величина которых зависит от пластичности заготовки и мощности машины.

При наладке процесса калибровки заготовки используют три основных измерительных прибора: шаблон с заданной кривизной, который прикладывают к внутренней или наружной поверхностям заготовки; прогибомер с индикаторами для измерения стрелы сегмента; лазерные сканеры, с помощью которых определяют кривизну участка изогнутой детали по меткам, нанесенным перед гибкой на наружную поверхность заготовки. Если есть вероятность образования трещины на опасном участке основного материала, покрытия или композита, то перед гибкой на этом участке наносят делительную сетку, после гибки определяют деформации и оценивают [1—4] вероятность образования трещины, при необходимости разрабатывают соответствующие конструкторские и технологические мероприятия.

На этапе калибровки элементы изогнутой кромки при перемещении между валками *1* и *2* дополнительно нагружают силой Q прижима заготовки валком *2* к валку *1* и реакцией Q_1 от верхнего валка или контактным напряжением $\sigma_{k1} = f(Q_1/(bl_{k1}))$ от верхнего валка и контактным напряжением $\sigma_{k2} = f(Q/(bl_{k2}))$ от нижнего валка, где l_{k1} и l_{k2} — размеры линий контакта с заготовкой соответственно верхнего и нижнего валков, которые можно определить CAD/CAE-моделированием. Значения σ_{k1} и σ_{k2} увеличиваются с нуля от начала контакта до максимальных значений $\sigma_{k1\max}$ и $\sigma_{k2\max}$, а затем уменьшаются до нулевого значения в конце контакта; так как $l_{k1} > l_{k2}$, то $\sigma_{k1\max} < \sigma_{k2\max}$ при $Q_1 \approx Q$.

Калибровку изогнутой кромки осуществляют по схеме пластического изгиба (рис. 2, эпюра) элементов в очаге деформаций на участке I между нормалью NG из точки N начала контакта заготовки с валком и осью Y и на участке VI между осью Y и нормалью $N'G'$ из точки N' окончания контакта заготовки с валком, а также на внеконтактном участке II между нормалями JC и NG. Воздействие контактных напряжений σ_k должно отразиться на распределении напряжений и деформаций по толщине заготовки и на силах, требуемых для изменения кривизны поверхности.

Для элементов, перешедших в пластическое состояние на участках I и VI, решаем совместно уравнение равновесия $d\sigma_r/dr + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r = 0$ и уравнение пластичности $\sigma_r - \sigma_\theta = \pm\sigma_s$ для зон растяжения (в последнем уравнении со знаком минус) и сжатия по толщине, используя для определения постоянной интегрирования граничные условия, по которым для зоны растяжения на наружной поверхности заготовки при $r = R'_1 = R_1 + s$ радиальное напряжение составит $\sigma_r = -\sigma_{k2}$, а для зоны сжатия на внутренней поверхности заготовки при $r = R_1$ радиальное напряжение составит $\sigma_r = -\sigma_{k1}$. Получим распределение напряжений σ_r и σ_θ по толщине s заготовки: в зоне растяжения ($r_n < r \le R'_1$): $\sigma_r = -[\sigma_s \ln(R'_1/r) + \sigma_{k2}]$ и $\sigma_\theta = \sigma_s - [\sigma_s \ln(R'_1/r) + \sigma_{k2}]$; в зоне сжатия ($R_1 \le r < r_n$): $\sigma_r = -[\sigma_s \ln(r/R_1) + \sigma_{k1}]$ и $\sigma_\theta = -\{\sigma_s + [\sigma_s \ln(r/R_1) + \sigma_{k1}]\}$. Приравняв напряжение σ_r зон растяжения и сжатия при $\sigma_{k1} \approx \sigma_{k2}$, получим радиус нейтрального слоя: $r_n = \sqrt{R_1(R_1 + s)}$, который смещен от срединного слоя радиуса $r_{\text{ср}} = (R_1 + R'_1)/2 = R_1 + s/2$ к внутренней поверхности заготовки. Изгибающий момент определяем как сумму моментов, создаваемых напряжениями σ'_θ и σ''_θ в зонах растяжения и сжатия относительно центра кривизны: $M_p = b\int \sigma'_\theta r dr + b\int -\sigma''_\theta r dr$, где для первого интеграла пределы заданы от r_n до R'_1,

а для второго — от R_1 до r_n. При $\sigma_{k1} = \sigma_{k2} = \sigma_k \approx 0$ имеем $M_p = \sigma_s bs^2/4$. На внеконтактном участке II напряжения σ_r и σ_θ определяются приведенными выше формулами для участков I и VI при $\sigma_{k1} = \sigma_{k2} = 0$ и замене R'_1 на $R_{II} \approx R$, а R_1 на $R'_{II} \approx R - s$; радиус нейтрального слоя приближенно составит $r_n = \sqrt{R(R-s)}$.

Напряжение текучести σ_s рассчитываем с учетом упрочнения по формуле $\sigma_s = \sigma_т + \sigma_в(1 + \delta_р)\varepsilon_i^n$ [1]. Показатель n упрочнения определяем из условия, что при испытании на растяжение в момент начала образования шейки $\sigma_s = \sigma_в(1 + \delta_р)$, $\varepsilon_i = \ln(1 + \delta_р)$, где $\sigma_в$ — предел прочности; $\delta_р$ — относительное равномерное удлинение по ГОСТ 11701—84. Логарифмированием получим: $n = \ln\{1 - \sigma_{0,2}/[\sigma_в(1 + \delta_р)]\}/\ln[\ln(1 + \delta_р)]$. Интенсивность ε_i деформаций на наиболее опасном (по образованию трещины) наружном слое участка I приближенно равна тангенциальной деформации ε_θ [1]:

$$\varepsilon_i \approx \varepsilon_\theta = [(R_1 + s)\varphi - (R_1 + s/2)\varphi]/[(R_1 + s/2)\varphi] = s/(2R_1 + s).$$

В зоне изгиба участков I и VI состояние очага деформации близко к плоскому деформированному состоянию при $\varepsilon_2 = \varepsilon_b = \varepsilon_z \approx 0$. При увеличении на $d\varphi$ угла φ изгибаемый элемент заготовки с координатами r и θ переместится с радиальной (u) и окружной (v) компонентами перемещения.

Принимаем следующие условия: перемещение u не зависит от θ, а v зависит от θ и является линейной функцией от r; следовательно, сечения остаются плоскими, толщина не изменяется, деформации представляют собой окружное удлинение в элементах снаружи нейтрального слоя, сжатие происходит внутри него, деформации совместны с напряжениями σ_r и σ_θ, кроме того, соответствуют условию несжимаемости заготовки, записанному через радиальную (ε_r) и тангенциальную (ε_θ) деформации: $\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = 0$, $\varepsilon_r = \partial u/\partial r$, $\varepsilon_\theta = (\partial v/\partial\theta)/r + u/r$.

Данным условиям удовлетворяют зависимости: $u = -[1/(2\varphi)](r + r_n^2/r)$ и $v = r\theta/\varphi$, где знак минус означает, что перемещение u направлено к центру кривизны; $0 \le \theta \le (\varphi + d\varphi)$ — угол между радиусом и сечением, от которого начинается охват заготовкой кромки инструмента. Тогда деформации: $-\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = [1/(2\varphi)](1 - r_n^2/r^2)$; бесконечно малые приращения деформаций: $-d\varepsilon_r = d\varepsilon_\theta = -[1/(2\varphi^2)] \times (1 - r_n^2/r^2)d\varphi$, $d\gamma_{r\theta} = 0$; конечные логарифмические деформации: $-\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \ln[(r\varphi/(r_n\varphi)] = \ln(r/r_n)$; относительные деформации: $\delta_r = (r_n/r) - 1$, $\delta_\theta = (r\varphi - r_n\varphi)/(r_n\varphi) = (r/r_n) - 1$.

На всех этапах калибровки момент, кривизна и напряжения, рассчитанные выше в серединах (по углу θ) участков I, VI и II, плавно уменьшаются до нуля на границах с недеформированными участками III, IV и V.

Из уравнения пластичности $\sigma_r - \sigma_\theta = \pm\sigma_s$ следует, что при надавливании заготовки вращающимся нижним валком к верхнему вращающемуся валку и в результате добавления к радиальному напряжению σ_r контактного напряжения σ_k от силы Q при неизменном напряжении текучести σ_s тангенциальное напряжение σ_θ по модулю уменьшается и, как следствие, уменьшается пружинение, и достигается калибровка кромки заготовки на выходе из валков *1* и *2*.

На этапе калибровки заготовки на ее двух боковых поверхностях напряжение σ_z, действующее вдоль образующей срединной поверхности заготовки в направлении ее ширины b, составит $\sigma_z = 0$. На некотором удалении от боковых поверхностей заготовки будут соблюдаться условия плоской деформации при $\varepsilon_b = 0$, где $\sigma_z \approx (\sigma_r + \sigma_\theta)/2$. Такая неравномерность деформированно-напряженного состояния (ДНС) в направлении ширины заготовки приводит к тому, что на выходе из-под верхнего и нижнего валков под действием упругих деформаций образующая срединной поверхности вблизи боковых поверхностей заготовки получит кривизну обратного знака по сравнению с кривизной срединной поверхности в тангенциальном направлении от изгиба заготовки верхним валком с радиусом R_1. Прямолинейность образующей будет иметь место лишь на участке плоской деформации, а краевые части заготовки изогнутся наружу и получат искажения в виде седловидности [3].

После подгибки боковым валком кромка заготовки становится изогнутой в сторону верхнего валка, вследствие чего площадь контакта и сцепления внутреннего слоя заготовки с верхним валком слева от плоскости симметрии, проходящей через центры окружностей верхнего и нижнего валков, становится больше площади контакта и сцепления наружного слоя заготовки с нижним валком. Поэтому при вращении верхний валок захватывает больше элементов внутреннего слоя заготовки и больше перемещает по своей поверхности от плоскости симметрии в направлении вращения, чем нижний валок. Поэтому край заготовки завивается в сторону вращающегося верхнего валка. При определенном повороте верхнего валка и в результате перемещения заготовки вправо силы пружинения от упругих деформаций элементов в сечении заготовки справа от плоскости симметрии превалируют над силами сцепления элементов с верхним валком, под действием этих сил пружинения сечение поворачивается в обратную от изгиба сторону, и элементы, контактирующие с верхним валком, отходят от верхнего валка. При дальнейшем перемещении от верхнего валка участки заготовки одновременно распрямляются от действия упругих де-

ve1219.fm Page 57 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

формаций, но, не распрямившись до прямой линии, завиваются в сторону верхнего валка с радиусом, превышающим радиус верхнего валка. Изменяя угол подгибки кромки заготовки боковым валком, силу прижима заготовки нижним валком к верхнему и коэффициенты трения между заготовкой и валками, можно после калибровки получить радиус откалиброванного участка заготовки, равным с определенной точностью радиусу заданной детали. При малой толщине заготовки по мере перемещения и калибровки все большее влияние оказывают силы тяжести откалиброванного участка заготовки, которые распрямляют участок от верхнего валка, и для устранения этого к откалиброванному участку снизу подводят второй боковой валок на следующем этапе гибки.

Гибка заготовки из композитов

Если при гибке композита слой материала, прилегающий к наружной поверхности изгибаемой заготовки, имеет напряжение текучести σ_{s2}, а слой, прилегающий к внутренней поверхности, напряжение σ_{s1}, то, решая совместно приведенные выше уравнения равновесия и пластичности, получим следующие распределения напряжений σ_r и σ_θ по толщине s участка, контактирующем с верхним и нижним валками: в зоне растяжения: $\sigma_r = -[\sigma_{s2}\ln(R_1'/r) + \sigma_{k2}]$ и $\sigma_\theta = \sigma_{s2} - [\sigma_{s2}\ln(R_1'/r) + \sigma_{k2}]$; в зоне сжатия: $\sigma_r = -[\sigma_{s1}\ln(r/R_1) + \sigma_{k1}]$ и $\sigma_\theta = -\{\sigma_{s1} + [\sigma_{s1}\ln(r/R_1) + \sigma_{k1}]\}$, а также на внеконтактном участке при $\sigma_{k1} = \sigma_{k2} = 0$. Приравняв напряжение σ_r для зон растяжения и сжатия, а также на границе между слоями композита, получим радиус нейтрального слоя r_n. Изгибающий момент определяем как сумму моментов, создаваемых напряжениями σ_θ' и σ_θ'' в зонах растяжения и сжатия относительно центра кривизны: $M_p = b\int \sigma_\theta' r\mathrm{d}r + b\int -\sigma_\theta'' r\mathrm{d}r$. Более точно гибку композитов можно исследовать при CAD-CAE-моделировании по методике работы [3].

Сила калибровки изогнутой кромки

При калибровке верхний и нижний валки вращаются и перемещают изогнутую под углом α кромку в направлении вращения под углом α'.

Для выполнения равновесия заготовки под действием сил, приложенных со стороны валков, на горизонталь проецируются силы (рис. 2):

1) сила Q прижима нижней поверхности заготовки нижним валком к верхнему и активная сила трения $T_2 = \mu_2 Q$, направленная по касательной к валку в точке M контакта с заготовкой и перемещающая заготовку в направлении вращения, если только нижний валок, как и верхний валок, является приводным валком; если нижний валок неприводной, то сила трения $T_2 = \mu_2 Q$ становится пассивной и направлена против направления перемещения заготовки;

2) реакция Q_1 от верхнего приводного валка на верхнюю поверхность заготовки и активная сила трения $T_1 = \mu_1 Q_1$;

3) реакция F_3, удерживающая заготовку боковым валком под углом α, и сила трения $T_3 = \mu_3 F_3$ между заготовкой и этим валком, направленная против перемещения заготовки;

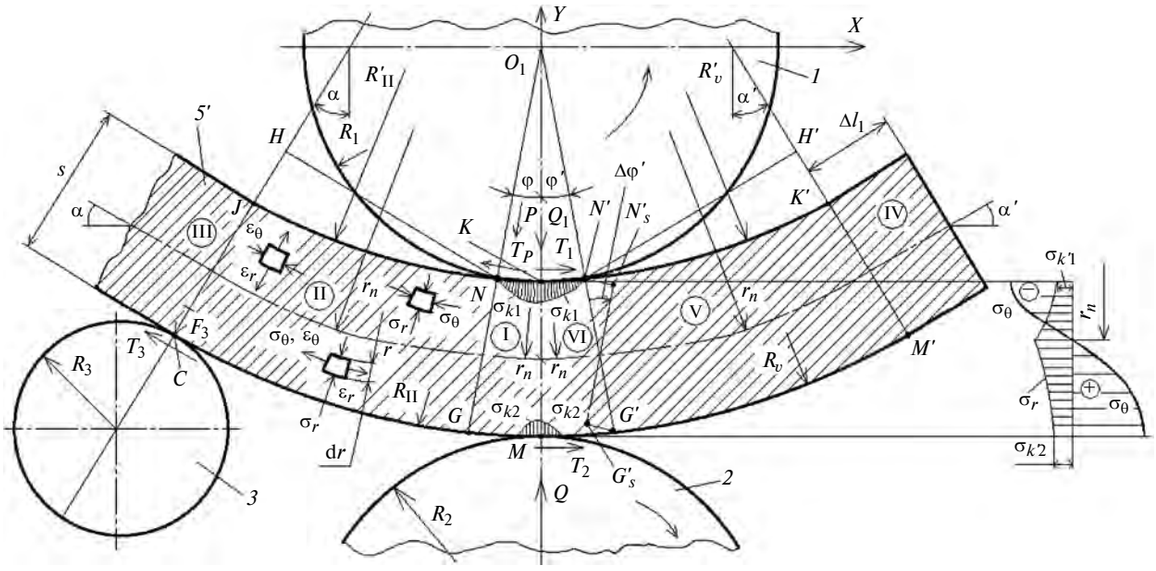


Рис. 2. Схема для расчета напряжений и сил при калибровке:
1 и *2* — верхний и нижний валки; *3* — боковой валок; *5'* — заготовка на этапе калибровки

4) реакция P вблизи точки N от верхнего приводного валка на верхнюю поверхность заготовки в результате поворота и пластического изгиба элементов заготовки в сечении NG относительно верхнего валка и сила $T_P = \mu_1 P$ трения, направленная против перемещения заготовки;

5) вес заготовки P_b в итоге:

$$\mu_2 Q + \mu_1 Q_1 = F_3(\sin\alpha + \mu_3\cos\alpha) + P(\sin\varphi + \mu_1\cos\varphi),$$

или при чаще всего применяемых значениях $Q_1 \approx Q$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$:

$$2\mu Q = F_3(\sin\alpha + \mu_3\cos\alpha) + P(\sin\varphi + \mu_1\cos\varphi), \quad (3)$$

коэффициенты μ_1 и μ_2 трения верхнего и нижнего валков по заготовке и коэффициент μ_3 трения качения бокового валка выбирают по справочникам.

Перечисленные выше силы проецируются на вертикаль:

$$F_3 = [P(\cos\varphi + \mu_1\sin\varphi) + P_b]/(\cos\alpha + \mu_3\sin\alpha). \quad (4)$$

Сила, равная реакции F_3, от двух гидравлических домкратов, перемещающих боковой валок, должна быть достаточной, чтобы не только поднимать и изгибать тяжелую заготовку на этапе подгибки кромки, но и удерживать заготовку в поднятом состоянии в процессе перемещения и изгиба элементов заготовки на этапе калибровки.

Силу P можно найти из равенства момента, создаваемого этой силой на границе NG контактного участка I и плечом $l_N = NH$, и момента M_p пластического изгиба: $P = \sigma_s bs^2/(4l_N)$ [1—4]. Так как кривизна внеконтактного участка II близка к нулю, то $\varphi \approx \alpha$, плечо l_N силы P относительно точки C определяем как $l_N = (R - s - R_1)\sin\alpha$. Минимальную силу Q определяем по формуле $Q_{\min} = P + P_b$.

Из формулы (3) следует, что если $2\mu Q \le F_3(\sin\alpha + \mu_3\cos\alpha) + P(\sin\varphi + \mu_1\cos\varphi)$, то активные силы трения $2\mu Q$ между вращающимися верхним и нижним валками и заготовкой не могут преодолеть необходимые для деформирования заготовки силы, и заготовка не будет перемещаться в направлении вращения валков. Если $2\mu Q > F_3(\sin\alpha + \mu_3\cos\alpha) + P(\sin\varphi + \mu_1\cos\varphi)$, то активные силы трения $2\mu Q$ преодолеют силы деформирования, и заготовка будет перемещаться в направлении вращения верхнего и нижнего валков, причем, чем больше $2\mu Q$, тем меньше проскальзывание валков относительно заготовки. Однако сила Q не должна быть слишком большой, чтобы калибровка не превратилась в холодную прокатку листа с уменьшением толщины заготовки. Коэффициенты трения μ_1 и μ_2 вращающихся валков по заготовке составят 0,3÷0,8, бóльшие значения применяют для горячекатаного стального листа, меньшие — для листов из цветного металла. Коэффициент μ_3 трения качения бокового валка приближенно в 10 раз меньше μ_1 и μ_2. На практике стараются увеличить коэффициенты трения μ_1 и μ_2, для этого заготовку очищают от смазочного материала, нанесенного на лист после прокатки для защиты от коррозии.

Увеличивая трение между заготовкой и приводными валками, не удается изгибать заготовку без существенного проскальзывания валков относительно заготовки, это снижает стойкость валков. Поэтому процесс гибки контролируют не по вращению верхнего и нижнего валков, а по фактическому перемещению заготовки относительно неподвижной станины.

Среднее теоретическое контактное напряжение σ_{k1} равно отношению силы прижима Q на суммарную площадь контакта с заготовкой верхнего валка $A_1 = R_1(\varphi + \varphi')b$ и нижнего валка A_2. Для упрощения примем: $\varphi = \varphi' = \alpha$, $A_2 = A_1$, тогда $\sigma_{k1} = \sigma_{k2} = Q/(4R_1\alpha b)$. На практике сила Q равна произведению давления жидкости на площадь гидроцилиндров, перемещающих нижний валок, и отражается на мониторе. Следовательно, чтобы перемещать и одновременно деформировать заготовку между вращающимися верхним, нижним и боковым валками, сила Q и коэффициенты трения μ_1 и μ_2 должны быть достаточно большими.

Рассчитав силу F_3 для наибольших геометрических параметров и показателей механических свойств детали и заготовки, с учетом веса бокового валка можно подобрать два стандартных гидравлических домкрата, которые для перемещения валка устанавливают по концам валка. Работу W_d деформации заготовки и мощность привода валков при калибровке определяет интеграл от активных сил трения $2\mu Q$ по ходу заготовки, которую можно определить CAD/CAE-моделированием. Величины F_3, Q и W_d используют при выборе машины и оснастки.

Пружинение заготовки после калибровки

После вращения верхнего и нижнего валков и калибровки участков I, VI и II выходящий из-под вращающихся валков откалиброванный участок $N'G'M'K'$ или V заготовки (см. рис. 2) под действием упругих деформаций, которые всегда сопровождают пластические деформации, из-за пружинения распрямится и исказится, точность понизится. Наружный радиус R_V участка должен быть равен наружному радиусу R заданной детали: $R_V = R$. При разгрузке наружные слои этого участка в зоне растяжения укорачиваются, а внутренние слои в зоне сжатия удлиняются. Это вызывает поворот поперечных сечений участка относительно нейтральной поверхности, при разгрузке по закону упругости совпадающей со срединной поверхностью участка. Поперечное сечение $N'G'$ в виде границы между участками VI и V поворачивается в положение $N'_s G'_s$ на угол пружинения $\Delta\varphi'$ (см. рис. 2).

По закону упругости $\sigma_\theta = E\delta = E\Delta l/l$ длина $l = R_V\alpha'$ деформированного наружного слоя после разгрузки уменьшится на $\Delta l = G'G'_s = (\sigma_\theta/E)l = (\sigma_s/E)R_V\alpha'$, при этом $\sigma_\theta = \sigma_s$, $\mathrm{tg}\Delta\varphi' \approx \Delta\varphi' = \Delta l/(s/2) = 2\Delta l/s$. Следовательно, расчетный угол пружинения составит:

$$\Delta\varphi' \approx \Delta\alpha' = K\mathrm{arctg}\{(2\sigma_s/E)[(R_V/s)\alpha']\} \approx \approx K\{(2\sigma_s/E)[(R_V/s)\alpha']\}. \quad (5)$$

При расчете по формуле (5) можно принять допущения: $\alpha' \approx \alpha$, $R_V \approx R$.

Принятые допущения учитывает коэффициент $K = \Delta\alpha_э/\Delta\alpha_т$, где $\Delta\alpha_э$ определяют экспериментально или по справочникам; $\Delta\alpha_т$ рассчитывают при $K = 1$. Если данные для $\Delta\alpha_э$ отсутствуют, то используем формулу (5) для $\Delta\alpha'$ при $K = 1$.

Так как при калибровке ДНС очага деформации неравномерно, то и разгрузка происходит неравномерно, что оставляет наружные слои несколько растянутыми, а внутренние слои несколько сжатыми. Это приводит к остаточным напряжениям σ_r''' и σ_θ''' после разгрузки заготовки.

Получена самоуравновешенная по условиям $\int\sigma_\theta by\mathrm{d}y = 0$, $\int\sigma_\theta b\mathrm{d}y = 0$ (в пределах от $-s/2$ до $s/2$ для обоих интегралов) эпюра остаточных напряжений на участке V. При больших значениях $R/s \gg 1$, которые, как правило, бывают при гибке детали радиуса R из листовой заготовки толщиной s на валковой машине, при разгрузке упругие деформации и напряжения уменьшаются до значений, близких к нулю ($\sigma_r''' \approx 0$ и $\sigma_\theta''' \approx 0$). Расчеты минимального радиуса изгиба без образования трещин и разрушения заготовки приведены в статьях [3, 4], но при гибке на валковых машинах трещин на заготовке, как правило, не возникает, и основная задача заключается в учете пружинения детали после гибки.

Поскольку калибровку изогнутой после подгибки кромки заготовки осуществляют в основном по верхнему валку с радиусом R_1, значительно меньшим радиуса детали ($R - s$), то после калибровки кривизна $1/R'_V$ кромки увеличивается (край заготовки завивается в сторону верхнего валка), а радиус кромки R'_V приближается к R_1 и становится значительно меньше величины ($R - s$). Поэтому, чтобы после калибровки приблизить радиус кромки R'_V к радиусу детали ($R - s$), рассчитанный по формулам (1) и (2) теоретический угол α подгибки необходимо уменьшить на величину $\Delta\alpha$, значение которой приближенно можно определить по формуле (5), а затем уточнить CAD/CAE-моделированием и при наладке процесса гибки. Если на машине подъем бокового валка осуществляют поворотом валка на угол γ (см. рис. 1, *а*) с помощью рычага $O_3O_{RO_3}$ по дуге окружности радиуса R_{O_3} с точкой опоры $O_{RO_3}(X_{ORO_3}, Y_{ORO_3})$, то для учета уменьшения пружинения и завивки кромки заготовки к верхнему валку после калибровки необходимо на этапе подгибки этой кромки угол γ уменьшить на $\Delta\alpha$ с хордой $\alpha' = 2R_{O_3}\sin(\Delta\alpha/2)$ при условии $\gamma \approx \alpha$. При этом усредненный радиус R_b подгибки относительно заданного радиуса R детали увеличится на величину ΔR, ориентировочно равную этой хорде a': $\Delta R \approx a'$; $R_b = R + \Delta R$.

Если на машине подъем бокового валка осуществляется перемещением по прямой $O_3O_3' = l_3$, наклонной к вертикали под углом β (см. рис. 1, *а*), то для учета завивки кромки после калибровки угол α на этапе подгибки уменьшают на $\Delta\alpha$, при этом ход валка l_3 уменьшится до $l_3' = [Y_{O_b} + |Y_{O_3}| - (R + R_3)\cos(\alpha - \Delta\alpha)]/\cos\beta$; $\Delta R \approx l_3 - l_3'$; $R_b = R + \Delta R$.

Следовательно, на этапе подгибки заготовку необходимо изгибать по радиусу $R_b > R$, чтобы после калибровки и разгрузки получить радиус R.

В CAD/CAE-системе Marc MSC Software смоделированы подгибка и калибровка листовой заготовки в валковой машине на основании теории гибки [1—4] и схем, показанных на рис. 1—2.

Размеры детали, заготовки и валков

Были выбраны следующие размеры цилиндрической детали: $D = 3000$ мм, $b = 3000$ мм, $s = 30$ мм; прямоугольной заготовки: $l_b = 9330$ мм — рассчитана по длине нейтрального слоя при гибке, $b = 3000$ мм; наибольшая (с учетом верхнего предельного отклонения) толщина $s = 30$ мм, $\Delta l_1 = s = 30$ мм; размеры валков (см. рис. 1, *б*): $R_1 = R_2 = 280$ мм, $R_3 = R_4 = 190$ мм, координаты центра левого бокового валка: $X_{O_3} = -580$ мм, $Y_{O_3} = -(R_1 + s + R_3) = -500$ мм, правого бокового валка, расположенного симметрично относительно плоскости YZ; боковые валки перемещаются по прямой под углом $\beta = 53{,}5°$ к вертикали.

В качестве материала заготовки использовали алюминиевый сплав АМг6М (ГОСТ 21631—76), который характеризуется высокой пластичностью и свариваемостью, поэтому широко применяется для обечаек ракет и в других изделиях. Его показатели механических свойств (ГОСТ 11701—84): $E = 71\,000$ Н/мм^2; отношение упругой относительной поперечной деформации к продольной $\upsilon = 0{,}33$; плотность $\gamma = 2{,}64 \cdot 10^{-9}$ т/мм^3; $\delta_р = 0{,}15$; относительное удлинение после разрыва $\delta_{fc} = 0{,}18$; $\sigma_т = \sigma_{0,2} = 155$ Н/мм^2; $\sigma_в = 315$ Н/мм^2, истинный предел прочности $\sigma_{в\,ис} = \sigma_в(1 + \delta_р) = 362$ Н/мм^2. Влияние коэффициента $Z_\theta = (\varepsilon_s - \varepsilon_b)/(0{,}5\varepsilon_l)$ ани-

ve1219.fm Page 60 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

зотропии данного сплава на листовую штамповку описано в работе [2].

Диаграмму напряжения текучести (ДНТ) σ_s в результате упрочнения заготовки с интенсивностью ε_i деформаций в процессе штамповки строили по формуле $\sigma_s = \sigma_{0,2} + \sigma_{\text{в ис}}\varepsilon_i^n$ при $0 \le \varepsilon_i \le \varepsilon_{i\,\text{lim}}$ и $n = \ln[1 - \sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в ис}})]/\ln[\ln(1 + \delta_{\text{р}})]$ [1—4]; $\sigma_s = \sigma_{s\,\text{lim}} = \sigma_{0,2} + \sigma_{\text{в ис}}\varepsilon_{i\,\text{lim}}^n = \text{const}$ при $\varepsilon_{i\,\text{lim}} < \varepsilon_i \le \varepsilon_{i\,\max}$; в CAD/CAE-систему вводили значения ε_i и σ_s в виде таблицы. Значение $\varepsilon_{i\,\text{lim}}$ определяли по диаграмме предельных деформаций, $\varepsilon_{i\,\max}$ в 3 раза больше $\varepsilon_{i\,\text{lim}}$, ДНТ аналогична диаграмме, показанной в статье [4]. Для повышения точности на начальных этапах гибки (интенсивное упрочнение) интервалы между значениями ε_i в таблице выбирали небольшими, а на конечных этапах (неинтенсивное упрочнение перед разрушением заготовки) интервалы увеличили. Толщину заготовки разделили на десять конечных элементов (КЭ) ($N_s = 10$), по ширине — $N_b = 10$ КЭ, по длине — $N_l = 10^3$ КЭ, всего 10^5 КЭ.

Результаты CAD/CAE-моделирования

Получены значения основных показателей ДНС по толщине и длине заготовки при гибке.

На рис. 3 (см. обложку) показано распределение интенсивности пластических деформаций на кромке заготовки после подгибки по толщине кромки (см. рис. 3, *а*; вид спереди) и по поверхности кромки (см. рис. 3, *б*; вид снизу). Между наружными растянутыми слоями и внутренними сжатыми слоями вблизи нейтрального слоя имеются слои, находящиеся в упругом состоянии и не перешедшие в пластическое состояние. Такая неоднородность ДНС вызовет увеличенное пружинение кромки в случае освобождения заготовки от валков и разгрузки. Чтобы уменьшить пружинение, применяют калибровку кромки прижимом заготовки между нижним и верхним валками и перемещением заготовки с изгибом по верхнему валку при вращении верхнего и нижнего валков. Подробно исследование ДНС кромки при подгибке описано в работе [1].

На рис. 4 (см. обложку) показано распределение интенсивности пластических деформаций на участке заготовки после калибровки вращающимися верхним, нижним и боковым валками по толщине (см. рис. 4, *а*; вид спереди) и по поверхности (см. рис. 4, *б*; вид снизу).

По наличию пластических деформаций на заготовке после калибровки выделены шесть зон (см. рис. 4):

1) недеформированный край длиной Δl_1 (см. рис. 2, зона IV), который перед подгибкой выступал за верхний и нижний валки;

2) зона V, сначала на этапе подгибки накопившая пластические деформации изгиба от бокового

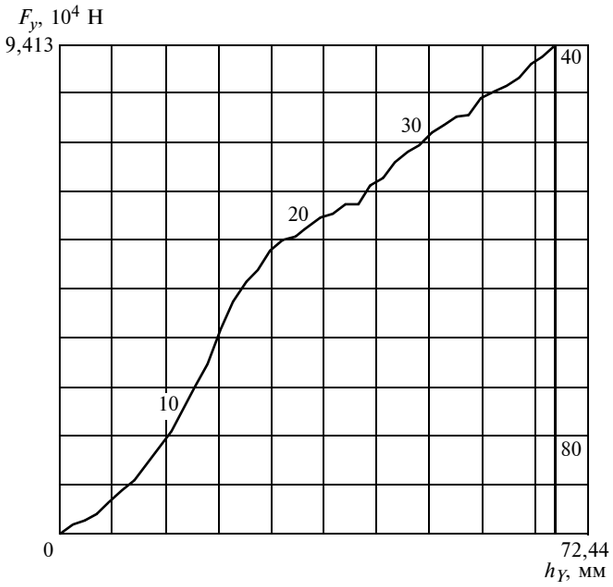


Рис. 5. Зависимость силы F_{y3} от перемещений h_Y бокового валка на этапах подгибки и калибровки

валка, а затем на этапе калибровки добавившая пластические деформации по всей толщине от сжатия между вращающимися нижним и верхним валками и изгиба вокруг верхнего валка при перемещении;

3) зона VI, на этапе калибровки получившая пластические деформации от сжатия между вращающимися нижним и верхним валками и изгиба вокруг верхнего валка при перемещении;

4) зона I, на этапе калибровки получившая пластические деформации от сжатия между вращающимися нижним и верхним валками и изгиба вокруг верхнего валка при перемещении;

5) зона II, накопившая пластические деформации изгиба при перемещении между боковым валком и вращающимися верхним и нижним валками;

6) зона III в виде пока еще недеформированной части заготовки.

Такая неоднородность ДНС после калибровки, как и после подгибки, приводит к пружинению и искажению поверхности заготовки на выходе за вращающиеся валки, что необходимо учитывать при проектировании процесса гибки. Если на этапе подгибки кромки процесс деформирования заготовки был нестационарным, то на этапе калибровки он близок к стационарному. Это видно по относительно равномерному распределению пластических деформаций на откалиброванном участке (см. рис. 4).

На рис. 5 показана зависимость вертикальной составляющей F_{y3} силы F_3 (в ньютонах) от вертикальной составляющей i-х перемещений (в миллиметрах) бокового валка на этапе подгибки края при $1 \le i \le N_b$ и на этапе калибровки этого края при

$N_b < i \le N_k$ ($N_b = 40$, $N_k = 80$). Видно, что на этапе подгибки кромки сила F_{y3} плавно увеличивается до определенного значения, а на этапе калибровки сила F_{y3} резко уменьшается и остается примерно одинаковой при неподвижном боковом валке и воспринимает силу изгиба заготовки при калибровке. Аналогично получены диаграммы сил, действующих на заготовку от всех валков.

Установлена следующая закономерность: после подгибки кромки заготовки боковым валком и последующей калибровки изогнутой кромки между вращающимися верхним и нижним валками, в результате прижима заготовки нижним валком к верхнему и образования контактных напряжений, радиальное сжимающее напряжение по толщине заготовки увеличивается, а тангенциальное напряжение по модулю уменьшается, вследствие чего пружинение участка заготовки после калибровки на выходе из-под верхнего и нижнего валков уменьшается по сравнению с подгибкой без калибровки, кроме того, площадь контакта заготовки с верхним валком больше площади контакта с нижним валком, и на выходе из контакта заготовки с верхним и нижним валками откалиброванный участок завивается в сторону верхнего валка. Соответственно радиус этого участка уменьшается и приближается к радиусу верхнего валка.

Поэтому для того чтобы после калибровки получить радиус кромки заготовки, равный радиусу детали с заданной точностью, необходимо уменьшить теоретически рассчитанный изгиб кромки заготовки на этапе подгибки, т. е. рассчитанный по формулам (1) и (2) теоретический угол α подгибки необходимо уменьшить на величину $\Delta\alpha$, значение которой приближенно можно определить по формуле (5), а затем уточнить CAD/CAE-моделированием и при наладке процесса гибки.

Так как для гибки на валковых машинах используют заготовки не только из высокопластичных материалов, но из материалов и композитов с покрытиями с низкими показателями пластичности (δ_p и δ_{fc}), то для исследования вероятности образования трещины на поверхностях изгибаемой заготовки целесообразно использовать критерии, представленные в работах [1—4]. Сначала на всех этапах моделирования процесса обработки заготовки получены распределения показателей ДНС по объему заготовки. Далее определяли штампуемость заготовки по коэффициенту C_m использования пластичности и запасу пластичности P_m ($m = l, t, s, i, \sigma, \sigma_1, F, R, \alpha, h$) до разрушения заготовки на основании критериев вероятности образования трещины, т. е. по параметрам ε_1, ε_s, $s_{\lim}$, ε_i, σ_i, σ_1, F, R_1, α, h_f, обоснованных в статьях [1—4]:

1) $C_l = \varepsilon_1/\varepsilon_{1\,\lim} < C_{l\,\lim}$ и
$P_l = (1 - \varepsilon_1/\varepsilon_{1\,\lim})100 > P_{l\,\lim}$;

2) $C_t = \varepsilon_s/\varepsilon_{s\,\lim} < C_{t\,\lim}$ и
$P_t = (1 - \varepsilon_s/\varepsilon_{s\,\lim})100 > P_{t\,\lim}$;

3) $C_s = s_{\lim}/s_{\min} < C_{s\,\lim}$ и
$P_s = (1 - s_{\lim}/s_{\min})100 > P_{s\,\lim}$;

4) $C_i = \varepsilon_i/\varepsilon_{i\,\lim} < C_{i\,\lim}$ и
$P_i = (1 - \varepsilon_i/\varepsilon_{i\,\lim})100 > P_{i\,\lim}$;

5) $C_\sigma = \sigma_i/\sigma_{i\,\lim} < C_{\sigma\,\lim}$ и
$P_\sigma = (1 - \sigma_i/\sigma_{i\,\lim})100 > P_{\sigma\,\lim}$;

6) $C_{\sigma 1} = \sigma_1/\sigma_{1\,\lim} < C_{\sigma 1\,\lim}$ и
$P_{\sigma 1} = (1 - \sigma_1/\sigma_{1\,\lim})100 > P_{\sigma 1\,\lim}$;

7) $C_F = F_3/F_{3\,\lim} < C_{F\,\lim}$ и
$P_F = (1 - F_3/F_{3\,\lim})100 > P_{F\,\lim}$;

8) $C_R = R_{1\,\min}/R_1 < C_{R\,\lim}$ и
$P_R = (1 - R_{1\,\min}/R_1)100 > P_{R\,\lim}$;

9) $C_\alpha = \alpha/\alpha_{\lim} < C_{\alpha\,\lim}$ и
$P_\alpha = (1 - \alpha/\alpha_{\lim})100 > P_{\alpha\,\lim}$;

10) $C_h = h_f/h_{f\,\lim} < C_{h\,\lim}$ и $P_h = (1 - h_f/h_{f\,\lim})100 > P_{h\,\lim}$; $C_{m\,\lim} = 1$, где $h_{f\,\lim}$ — длина участка заготовки перед образованием трещины на испытуемой заготовке при подгибке и калибровке.

Значения $P_{l\,\lim}$, $P_{t\,\lim}$, $P_{s\,\lim}$, $P_{i\,\lim}$, $P_{\sigma\,\lim}$, $P_{\sigma 1\,\lim}$, $P_{F\,\lim}$, $P_{R\,\lim}$, $P_{\alpha\,\lim}$, $P_{h\,\lim}$ рекомендуется задавать равными или больше δ_p. При запасе пластичности $P_{m\,\lim} > 2\delta_p$ в целях экономии можно использовать заготовки из более дешевого материала или меньшей толщины. Установлено, что нет опасности образования трещин на заготовке при калибровке кромки. Также были построены графики сил по ходу всех валков и определена работа обработки заготовки.

Если в результате CAD/CAE-моделирования выявлены: высокая вероятность образования трещины, низкая точность размеров или чрезмерное пружинение заготовки после подгибки и калибровки, то в проект CAD/CAE-системы вносят требуемые изменения [1—4] в геометрию детали или параметры обработки заготовки. Моделирование выполняют до тех пор, пока не будут достигнуты заданные параметры детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Жарков В. А.** Гибка листов и профилей на четырехвалковой машине для корпусов ракет, трубных и каркасных изделий. Часть 1 // Вестник машиностроения. 2019. № 8. С. 56—66.

2. **Жарков В. А.** Испытания материалов. Анизотропия листов и ее влияние на листовую штамповку // Вестник машиностроения. 2017. № 11. С. 46—55.

3. **Жарков В. А.** Испытания материалов // Вестник машиностроения. 2016. № 6, 8; 2017. № 1, 4, 8, 11; 2018. № 2, 5, 10; 2019. № 2, 6.

4. **Жарков В. А.** Моделирование в системе Marc обработки материалов в машиностроении. Ч. 1—7 // Вестник машиностроения. 2012. № 8—12; 2013. № 2, 3.

ve1219.fm Page 62 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 621.914

А. С. КАЛАШНИКОВ, д-р техн. наук, Ю. А. МОРГУНОВ, А. Н. ВАСИЛЬЕВ, В. М. АББЯСОВ, кандидаты технических наук (Московский политехнический университет), e-mail: alexandr_kalashnikov45@ramdler.ru

Особенности технологии изготовления конических колес с круговыми зубьями в малоотходном производстве

Предложена технология изготовления ведомых конических колес из заготовок со штампованными зубьями. Проанализированы условия механической обработки заготовки и штампованных зубьев. Особое внимание уделено нарезанию штампованных зубьев резцовыми головками разных конструкций.

Ключевые слова: горячая штамповка, штампованные зубья, механическая обработка, припуск под зубонарезание, резцовая головка.

A technology is proposed for the manufacture of driven bevel wheels from billets with stamped teeth. The conditions of machining the billet and stamped teeth are analyzed. Particular attention is paid to cutting of stamped teeth with cutter heads of various designs.

Keywords: hot stamping, stamped teeth, machining, gear cutting allowance, tool head.

Рациональное использование материала традиционно является одним из основных направлений развития технологий в современном машиностроении. Использование заготовок, размерная точность и точность формы которых максимально приближены к готовой детали, значительно сокращает расход металла и повышает эффективность технологических процессов [1]. Область применения малоотходных технологий постоянно расширяется и охватывает детали сложной геометрической формы, например, конические передачи с круговыми зубьями.

Конические передачи образуют колеса с криволинейными зубьями, продольная кривизна которых определяется дугой окружности с углом наклона $\beta_m = 30 \div 35°$ в середине зубчатого венца. Конические передачи имеют в зацеплении более двух зубьев, низкую чувствительность к смещениям осей при высокой нагрузке, которую передают плавно и бесшумно. Их широко применяют в ответственных и быстроходных узлах в авто-, тракторо- и авиастроении, а также в других отраслях промышленности [2]. Особенность изготовления ведомых и ведущих колес конической передачи — низкий коэффициент использования металла $K_{им} \leq 0{,}5$. При этом наибольшее количество металла уходит в стружку на операциях нарезания зубьев и увеличивается с увеличением числа зубьев и модуля колеса.

Изучение технологии изготовления конических ведомых колес с углом делительного конуса 68° и более показало, что до химико-термической обработки (ХТО) зубья получают методом врезания, при этом удаляется более 95 % металла из впадин. Чаще всего обработку выполняют трехсторонними резцовыми головками, в которых установлены средние, наружные и внутренние резцы.

При нарезании зубьев методом единичного деления трехстороннюю резцовую головку, установленную в середине зубчатого венца, быстро подводят к точке начала резания, а затем осуществляют врезание с постоянной или переменной радиальной подачей. При достижении полной глубины впадины выполняют быстрый отвод головки до точки начала обработки следующей впадины. После завершения обработки всех впадин зубчатого колеса осуществляют быстрый отвод резцовой головки в исходное положение [2].

С целью снижения расхода металла, удаляемого из впадин, при изготовлении ведомой шестерни конической передачи редуктора заднего моста грузового автомобиля использовали поковки из стали 30ХГТ со штампованными зубьями. Параметры поковки: число зубьев $z = 25$, внешний окружной модуль $m_{te} = 9$ мм, средний угол наклона зуба $\beta_m = 35°$, угол профиля $\alpha = 20°$, ширина зубчатого венца $b = 38$ мм, внешняя высота зуба $h_e = 16{,}99$ мм (рис. 1). Конструкция зубьев поковки предусматривала их обработку за две операции: предварительное зубонарезание в незакаленном состоянии и окончательное зубошлифование после ХТО.

Для стабильного получения поковок ведомых конических колес высокого качества в производстве необходимо выполнить следующие требования: смещение осей верхней и нижней матрицы по разъему в штампе не более 1 мм; разностенность поковок не более 2 мм; допускаются внешние дефекты на поверхностях поковки и во впадинах зубьев глубиной не более 0,4 мм.

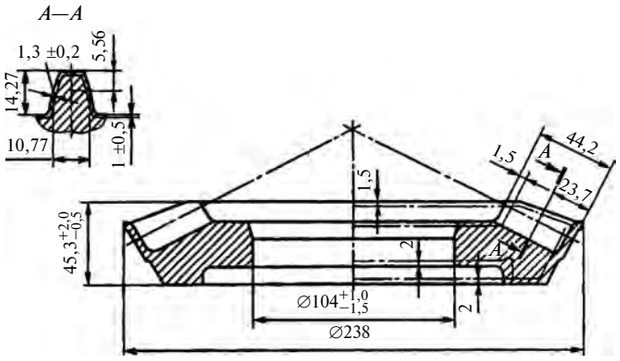


Рис. 1. Поковка ведомого конического колеса со штампованными зубьями

ve1219.fm Page 63 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

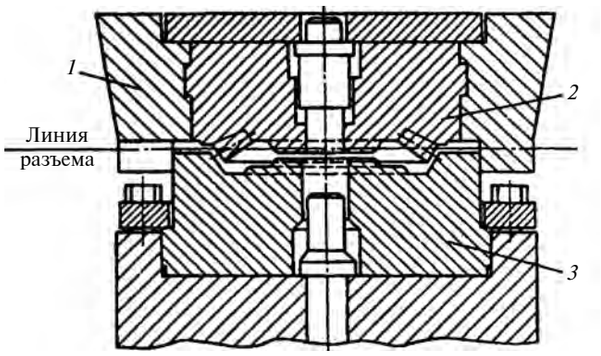


Рис. 2. Ковочный штамп второго перехода

Поковки с зубьями штамповали на кривошипных горячештамповочных прессах с номинальным усилием 4 кН. Мерные заготовки нарезали из горячекатаного прутка диаметром 100 мм и нагревали в индукционных печах до температуры 1230÷1260 °С и штамповали в два перехода: осадка и окончательная штамповка с формообразованием зубьев.

Осадка (первый переход) необходима для очистки заготовки от окалины и получения ее внешнего диаметра, близкого к диаметру поковки, что обеспечивает хорошее заполнение зубчатой матрицы на втором переходе штамповки. Производительность штамповки 85 шт./ч.

На втором переходе штамповку осуществляли в штампах "замковой" конструкции (рис. 2), в которых линия разъема проходит по наибольшему диаметру поковки колеса. Зубчатый венец образуется в верхней части штампа. Конструкция ковочного штампа, при которой верхняя часть *1* центрируется по нижней части *3* с зазором 0,3÷0,4 мм, не допускает чрезмерных смещений по линии разъема и повышает точность расположения зубчатого венца относительно оси. Следующую операцию — обрезку облоя и прошивку отверстия в поковках проводили с одного нагрева на обрезных прессах в комбинированных штампах.

Основная деталь ковочного штампа второго перехода — зубчатая матрица *2*, в которой происходит формообразование зубчатого венца. Матрицу изготовляли из высоколегированной штамповой стали 4ХМФС. С учетом размеров матрицы и условий работы в штампе зубья прожигали электроэрозионным методом на современном копировально-прошивочном станке с ЧПУ при осевом движении электрода-инструмента из графита, выполненного в виде конического зубчатого колеса [3]. Получаемый зубчатый венец имел 7-ю степень точности по ГОСТ 1758—81 и шероховатость Ra = 1,25 мкм боковых поверхностей зубьев и дна впадин.

Наиболее благоприятный температурный режим при штамповке зубчатыми матрицами — их нагрев до 150÷350 °С [2]. Перед штамповкой зубчатые матрицы подогревали газовыми горелками до температуры выше 100 °С. Чтобы не допустить перегрева матриц, в результате которого их стойкость резко снижается, штамповку осуществляли поочередно в двух штампах. Стойкость зубчатых матриц при штамповке ведомых конических колес составила 1,5÷2,0 тыс. поковок. По мере накопления статистических данных о стойкости зубчатых матриц ввели принудительный съем штампов, чтобы исключить поступление бракованных поковок в производство.

Для обеспечения хорошей механической обработки и получения мелкозернистой равномерной структуры металла перед цементацией и последующей закалкой после штамповки заготовки подвергали термической обработке. Лучшие результаты получены после изотермического отжига в среде защитного газа по схеме: индукционный нагрев до температуры 950 °С и выдержка 3 ч, быстрое охлаждение до температуры 650 °С и выдержка 4 ч, затем охлаждение в воде [4].

Для полного удаления окалины, которая приводит к снижению стойкости и повреждению (выкрашиванию) режущих кромок зуборезного инструмента, дополнительно применяли дробеструйную очистку зубчатого венца поковки остроугольной дробью с размерами 0,8÷1,1 мм. После отжига получили металл с твердостью 180÷200 *HB* и равномерной структурой, состоящей из феррита и перлита с размером зерна 6 и менее по ГОСТ 5639—82 (рис. 3).

После штамповки очень важно систематически визуально контролировать качество поковок с предварительно отштампованными зубьями — нали-

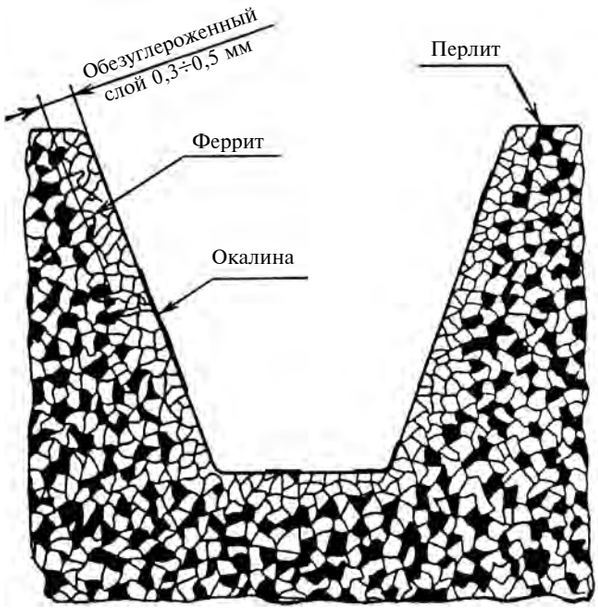


Рис. 3. Структура металла в сечении штампованного зуба

ve1219.fm Page 64 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

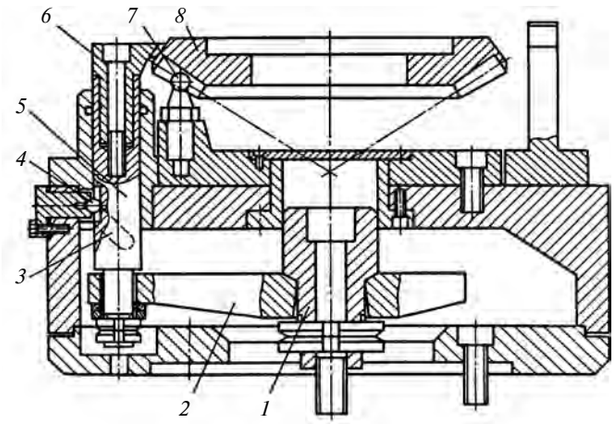


Рис. 4. Зажимное приспособление для поковок с зубьями:
1 — тяга; *2* — рычаг; *3* — криволинейный паз; *4* — шарики; *5* — шток; *6* — кулачок; *7* — палец; *8* — поковка

чие внешних дефектов, высота поковки, внешний диаметр, величина облоя и диаметр отверстия. Качество зубчатого венца поковок проверяли на специальном приспособлении индикаторного типа.

На основных операциях механической обработки поковки базировали по боковым поверхностям отштампованных зубьев, на контрольном приспособлении поковку устанавливали зубьями на шесть сферических пальцев диаметром 10 мм. Допустимое биение торца поковки за один оборот составило −0,5/+2,0 мм. При необходимости на этом приспособлении можно проверять биения базового торца и посадочного отверстия, а также колебания припуска на боковых поверхностях зубьев. Для уменьшения разброса показаний колебания припуска на зубьях целесообразно контролировать за одну установку поковки и только на зубьях, в которых нет сферических пальцев.

Наиболее важной и ответственной в малоотходном производстве при изготовлении конических колес является первая операция механической обработки. Поковки конических колес со штампованными зубьями на первой операции обрабатывали на вертикальных токарных полуавтоматах. Заготовки базировали по боковым поверхностям штампованных зубьев при установке на сферические пальцы *7* (рис. 4). Поковки *8* закрепляли в приспособлении по заднему конусу тремя кулачками *6* при перемещении штоков *5* вниз.

На первой операции обрабатывали отверстие и торцы заготовки с обеспечением точности расположения их поверхностей между собой и относительно боковых поверхностей зубьев. Особенность первой операции — слой металла, снимаемый с внешнего базового торца заготовки, в значительной степени определяет величину припуска по дну впадины и боковым поверхностям зубьев.

Колебание припуска на обеих сторонах контролировали на специальном приспособлении с помощью измерительного сферического наконечника, контактирующего с выпуклой и вогнутой стороной зуба (рис. 5). Показания индикатора (по вертикали) в диапазоне 3,0÷3,5 мм у всех контролируемых деталей обеспечивают общий припуск 1,1÷1,5 мм на сторону зуба. При этом припуск под черновое зубонарезание на сторону зуба составил 0,9÷1,2 мм, а под чистовое зубошлифование — 0,2÷0,3 мм.

Особое внимание в малоотходном технологическом процессе уделяется зуборезной операции. Зуборезный инструмент обрабатывает поверхность металла, полученную непосредственно после горячей штамповки. Поэтому к традиционным условиям резания добавляются колебания припуска по боковым поверхностям и дну впадины, наличие окалины и обезуглероженного слоя (см. рис. 3). При этом после предварительного зубонарезания качество поверхности и точность зубьев должны быть такими же, как при традиционной обработке, что в малоотходном производстве при окончательном зубошлифовании обеспечивает высокое качество деталей [5].

Зубья ведомых колес нарезали трехсторонними резцовыми головками с последовательностью установки резцов: средний, наружный, средний, внутренний и т. д. Средние резцы устанавливали так, чтобы их вершины на 0,2÷0,25 мм были выше вершин наружных и внутренних резцов. Правое направление вращения резцовой головки соответствовало направлению линии криволинейного зуба. Резание осуществляли от внутреннего конца зуба к внешнему, в этом случае силы резания прижимают заготовку к торцу зажимного приспособления [2, 4, 5].

Так как зубья нарезали в заготовках с предварительно штампованными зубьями, то в процессе резания вращающуюся резцовую головку (стрелка *А*) быстро подводили (стрелка *Б*) непосредственно во впадину зуба (рис. 6). Для предотвращения поломок резцов, вызванных колебанием припуска на боковых поверхностях и дне впадины, быстрый подвод резцовой головки прекращали после достижения 1,5÷2,0 мм зазора между вершинами средних резцов и дном впадины. Затем обработку вели

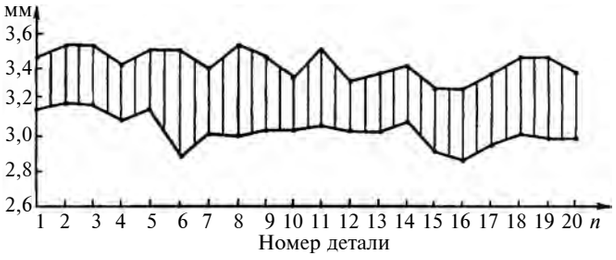


Рис. 5. Контроль колебания припуска

ve1219.fm Page 65 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

на медленной радиальной подаче (стрелка *B*). Ускоренный цикл обработки позволил повысить производительность зубонарезания на ≈30 % по сравнению с нарезанием зубьев из целого металла. Время обработки одной впадины сократилось с 14 до 10 с/зуб, включая время 3÷4 с холостого хода и время 6÷7 с резания.

В крупносерийном и массовом производствах выдержать постоянный припуск на зубьях, полученных методом горячей штамповки, очень сложно. Значительные колебания припуска на боковых поверхностях зубьев в пределах одного оборота колеса при нарезании существующими методами вызывает отжим наружных *1* и внутренних *3* резцов головки *2*, а в отдельных случаях и их поломку [6].

Для обеспечения высокого качества и производительности разработана новая технология зубонарезания. Вначале при медленной подаче врезания головки *2* (стрелка *B*) вершины наружных *1*, средних *4* и внутренних *3* резцов осуществляют резание только дна впадины, удаляя припуск Δh. Как только наружные и внутренние резцы достаточно углубятся во впадину, они за счет геометрии (развода) резцов одновременно с обработкой дна впадины начинают обработку боковых поверхностей зубьев. При углублении вершин наружных и внутренних резцов во впадину зуба их жесткость повышается, и они воспринимают высокие и переменные силы резания, действующие перпендикулярно боковой режущей кромки. Такая технология нарезания зубьев требует согласования развода и высоты установки резцов, а также величин припусков по боковым поверхностям и дну впадины зубьев.

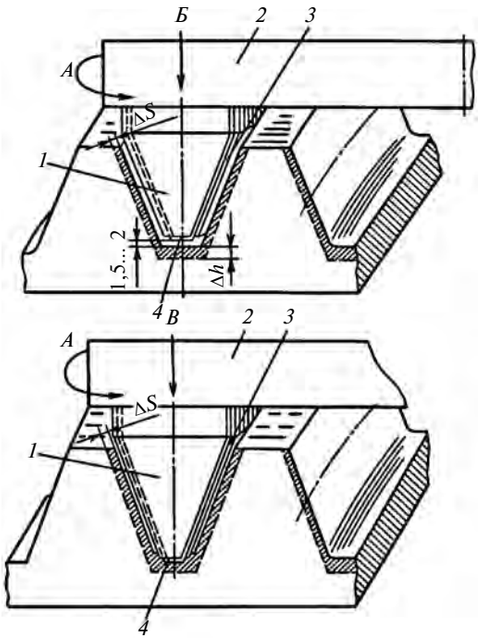


Рис. 6. Нарезание штампованных зубьев конических колес

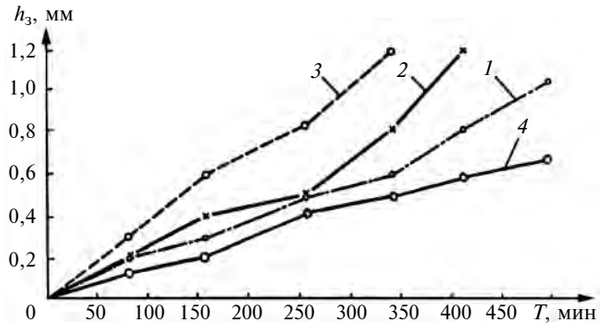


Рис. 7. Зависимости износа $h_з$ резцов зуборезных головок по задней поверхности от времени *T* работы

Сравнительные исследования режущих свойств резцовых головок проводили в производственных условиях на жестком зуборезном станке ZFKK 500×10 ("Модуль", Германия) при скорости резания $V = 34$ м/мин и подаче — времени обработки одного зуба 10 с/зуб. Материал заготовок — низкоуглеродистая сталь 18ХГТ (твердость 156÷207 *HB*, предел прочности при растяжении $\sigma_{вр} = (55 \div 72)10^2$ Па. В качестве СОЖ использовали масло индустриальное-20.

Для испытаний использовали трехсторонние резцовые головки со вставными резцами номинальным диаметром 304,8 мм следующих конструкций:

1) 32 затылованных резца — 16 средних, 8 наружных и 8 внутренних, каждый резец закрепляли болтом в пазу корпуса головки;

2) 36 затылованных резцов — 18 средних, 9 наружных и 9 внутренних, которые закрепляли в пазах корпуса головки с помощью клиньев и винтов;

3) 36 острозаточенных резцов — 18 средних, 9 наружных и 9 внутренних, каждый резец в виде бруска закрепляли в длинном пазу по высоте корпуса головки двумя винтами.

Резцы всех головок изготовлены из быстрорежущей стали Р6М5 твердостью 62÷65 *HRC*. За критерий затупления резцов принят износ по задней поверхности $h_з = 0{,}8 \div 1{,}2$ мм, а качества поверхности зубьев — шероховатость $Ra \le 3{,}2$ мкм.

Анализируя стойкость резцов головок (рис. 7), отметим, что износ резцовых головок с 32 резцами, закрепленными болтами, на ≈20 % меньше при новой технологии (линия *2*) зубонарезания по сравнению с резанием по традиционной технологии (линия *3*). Новую технологию резания применили также при обработке 36 резцами с клиновым закреплением (линия *1*) и 36 острозаточенными резцами с износостойким покрытием (линия *4*). Из графика видно, что более жесткие острозаточенные резцы при работе по новой технологии имеют значительные преимущества по стойкости и работоспособности. Износостойкое покрытие нитрида титана (TiN) способствовало повышению режущих свойств острозаточенных резцов.

ve1219.fm Page 66 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 621.91.01

О. Ю. ЕРЕНКОВ, д-р техн. наук, Е. В. ЯВОРСКАЯ, Д. О. ЯВОРСКИЙ, А. М. КАЛЕНСКИЙ (Тихоокеанский ГУ, г. Хабаровск), e-mail: Erenkov@list.ru

Предварительная обработка поверхностно-активными веществами заготовок из полимерных композиционных материалов для повышения качества точения

Исследованы шероховатости поверхностей после токарной обработки полимерных материалов, прошедших предварительную обработку поверхностно-активными веществами. Установлено, что данная предварительная обработка заготовок повышает качество поверхности, обработанной точением.

Ключевые слова: полимерный материал, поверхностно-активные вещества, точение, шероховатость.

Roughness of surfaces after turning of polymeric materials that have undergone preliminary treatment with surface-active substances are investigated. It is determined, that this pre-treatment of billets improves the quality of the surface processed by turning.

Keywords: polymeric material, surface-active substances, turning, roughness.

При обработке конструкционных материалов часто применяют комбинированные способы обработки, например, перед точением подвергают заготовку воздействию током или агрессивной средой [1, 2], в результате чего повышается производительность и качество обработки, стойкость инструмента.

Для улучшения механической обработки полимерных материалов [3, 4] были разработаны способы снижения сопротивления разрушению поверхностных слоев заготовок при резании, которые заключаются в предварительной обработке заготовки поверхностно-активными веществами (ПАВ), в результате которой в поверхностном слое после механической обработки происходит упорядочивание распространения трещин вдоль магистральной линии.

Цель данной работы — экспериментальное исследование качества токарной обработки полимерных материалов после предварительной обработки ПАВ.

В качестве полимерных материалов исследовали капролон В (ТУ 5.966-13411—93) и текстолит ЛТК (ГОСТ 5—78), которые относятся к разным группам полимеров: капролон — термопласт, текстолит — реактопласт.

Токарную обработку образцов выполняли на универсальном токарно-винторезном станке 16К20Ф3С47. Геометрические параметры и материал режущего инструмента, скорость резания и подачу выбирали на основании ранее проведенных исследований [2] и при каждой серии экспериментов поддерживали постоянными. Качество обработанной точением поверхности оценивали по параметрам шероховатости [2].

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 62)

Таким образом, показано, что разработанная малоотходная технология изготовления конических колес со штампованными зубьями более эффективна, особенно в условиях крупносерийного и массового производства и обеспечивает стабильное и высокое качество обработки деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Калашников А. С., Сергеев Ю. Н., Шароян-Сарингулян Л. Г.** Малоотходные технологические процессы изготовления заготовок зубчатых колес // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 3. С. 16, 17.

2. **Klingelnberg Jan.** Kegelrader. Springer—Verlag, Berlin—Heidelberg, Germany, 2008. 379 p.

3. **Bausch Tomas.** Innovative Zahnradfertigung. Expert Verlag GmbH, D-71262, Renningen, Germany, 2006. 778 p.

4. **Калашников А. С., Моргунов Ю. А., Калашников П. А.** Современные методы обработки зубчатых колес. М.: Издательский дом "Спектр", 2012. 238 с.

5. **Производство** зубчатых колес газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, И. С. Нежурин и др. М.: Высшая школа, 2001. 493 с.

6. **Савельев А. В., Комиссаров С. А.** Повышение точности поковок прямозубых шестерен со штампованными зубьями // Технология машиностроения. 1982. № 1. С. 5—8.

ve1219.fm Page 67 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

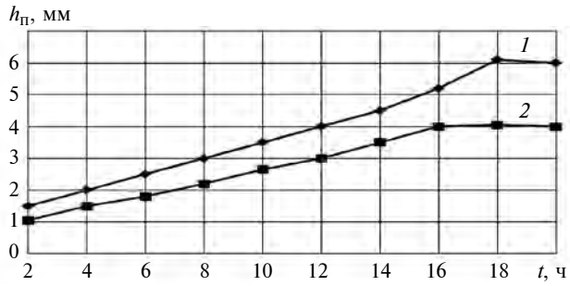


Рис. 1. Зависимость глубины $h_п$ проникновения ПАВ в капролон (*1*) и текстолит (*2*) от времени *t* обработки

ПАВ для обработки полимерных материалов выбирали на основании рекомендаций работы [5] с учетом растворимости исследуемых полимеров в агрессивных средах, т. е. образцы из капролона подвергали обработке в ацетоне, а образцы из текстолита — в толуоле. Продолжительность предварительной обработки заготовок для обеспечения требуемой глубины $h_п$ проникновения агрессивной среды рассчитывали по методике, приведенной в работах [6, 7]. Результаты данных расчетов представлены на рис. 1. Для обеспечения глубины проникновения ПАВ $h_п$ = 2 мм продолжительность

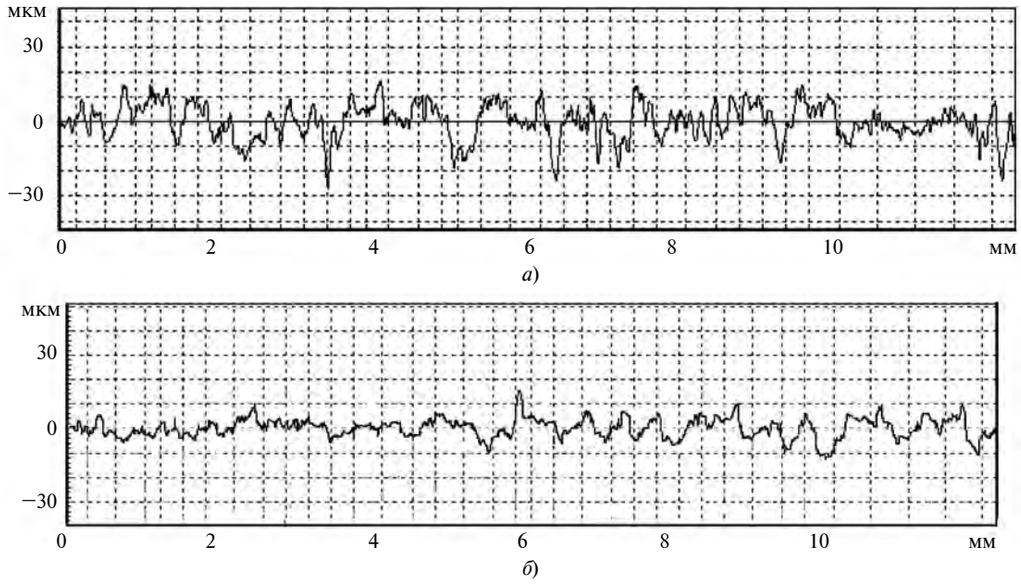


Рис. 2. Профилограммы поверхностей деталей из капролона при точении без предварительной обработки ПАВ (*а*) и с обработкой (*б*)

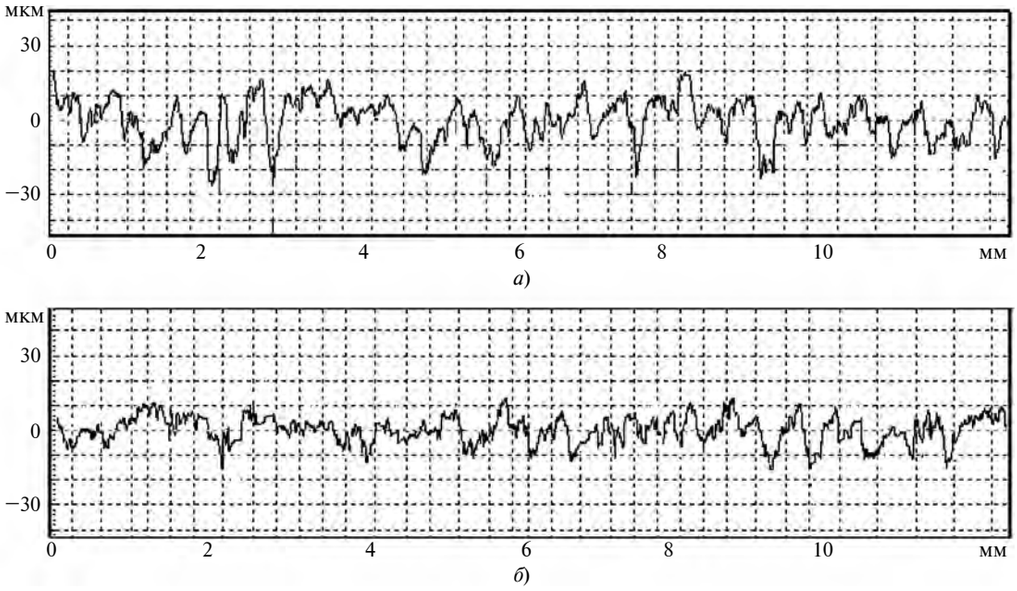


Рис. 3. Профилограммы поверхностей деталей из текстолита при точении без предварительной обработки ПАВ (*а*) и с обработкой (*б*)

ve1219.fm Page 68 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Значения параметров шероховатости поверхностей заготовок с предварительной обработкой ПАВ и без нее при $t_р$ = 2 мм, мкм

Материал	Обработка	*Ra*	*Rz*	R_{max}	*Rp*	*Rm*	*Sm*	*Sk*
Капролон	ПАВ + точение	4,39	11,60	15,20	7,60	5,89	0,88	−0,17
	Точение	7,60	22,72	35,97	14,02	21,95	0,33	0,27
Текстолит	ПАВ + точение	4,88	21,16	28,80	12,36	8,22	0,15	−0,18
	Точение	10,00	40,53	48,43	26,27	22,16	0,21	0,56

обработки составили соответственно для заготовок из капролона 4 ч, для текстолита — 7,4 ч.

На рис. 2 и 3 представлены профилограммы обработанных точением поверхностей деталей из капролона и текстолита. Глубина резания в данной серии экспериментов составляла 2 мм. Визуальное обследование профилограмм показало, что предварительная обработка ПАВ заготовок из капролона и текстолита обеспечивает повышение качества обработки точением. Обработанные поверхности оценивали по параметрам шероховатости [2] (таблица), анализ которых показал, что предварительная обработка заготовок может снижать параметры шероховатости обработанной точением поверхности капролона в 1,8 раза, а текстолита в 4,5 раза.

Также исследовали качество обработанных поверхностей заготовок из капролона и текстолита в зависимости от глубины резания по среднеарифметическому отклонению профиля, т. е. по параметру шероховатости *Ra*. Глубину резания $h_р$ варьировали от 1,5 до 2,6 мм.

На рис. 4 представлены зависимости параметра *Ra* обработанных поверхностей точением заготовок из капролона и текстолита.

При $h_р < h_п$ обработанная поверхность имела высокий параметр шероховатости, даже выше исходного образца. Это объясняется охрупчиванием поверхностного слоя заготовки, т. е. наличием большого числа внешних и внутренних дефектов в виде трещин и микротрещин, образующихся под действием ПАВ.

Минимальная шероховатость при прочих равных условиях наблюдается при $h_р = (1 \div 1{,}15)h_п$. Это объясняется тем, что в кристаллических полимерах имеются и аморфные участки. А представление данных полимеров как материала со структурой с четко разделенными фазами — неправильное. Между кристаллическими и аморфными участками имеются участки с промежуточной упорядоченностью, т. е. нет четкой границы между фазами, так как одна макромолекула может находиться в нескольких кристаллитах, проходя через несколько аморфных зон [8]. Поэтому четкой границы между обработанными и необработанными ПАВ участками нет, имеются переходные слои, распространяющиеся на глубину, превышающую глубину $h_п$ проникновения. В переходном слое в результате воздействия ПАВ часть химических и межмолекулярных связей разрушена, а другая часть ослаблена, что при точении облегчает деформирование срезаемого слоя, т. е. снижается сопротивление резанию и обеспечивается более стабильное распространение магистральной трещины перед режущим клином, что и способствует снижению шероховатости обработанной поверхности.

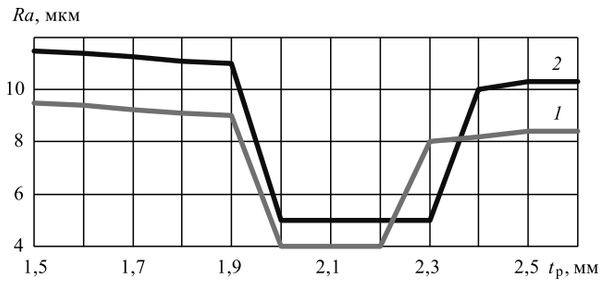


Рис. 4. Зависимости параметра *Ra* шероховатости обработанной поверхности от глубины $h_р$ резания при обработке капролона (*1*) и текстолита (*2*)

При дальнейшем увеличении глубины $h_р$ резания шероховатость резко повышается до шероховатости поверхности, обработанной точением без применения ПАВ, и остается постоянной.

Таким образом, установлено, что предварительная обработка заготовок ПАВ повышает качество обработанной точением поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Подураев В. Н.** Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1974. 430 с.
2. **Еренков О. Ю., Ковальчук С. А.** Инновационные технологии полимерных композиционных материалов. Хабаровск: Тихоокеанский ГУ, 2016. 178 с.
3. **Пат. 2203183 Рос. Федерации:** МПК 7 B 29 C 69/00 (51). Способ обработки деталей из пластмасс.
4. **Пат. 2494865 Рос. Федерации:** МПК B 29 C 37/00 (51). Способ обработки заготовок из пластмасс.
5. **Зуев Ю. С.** Разрушение полимеров под воздействием агрессивных сред. М.: Химия, 1972. 229 с.
6. **Расчет** диффузионных параметров взаимодействия агрессивной среды с полимерными материалами / О. Ю. Еренков, Е. А. Мясников, Е. Г., Калита, Р. С. Мазин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 8. С. 42—45.
7. **Erenkov O. Yu., Kalita E. G., Mazin R. S.** Calculating diffusion parameters for a corrosive medium acting on polymer materials // Chemical and Petroleum Engineering. 2009. V. 45. Is. 7, 8. P. 505—512.
8. **Карташов Э. М., Цой Б., Шевелев В. В.** Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров. М.: Химия, 2002. 736 с.

ve1219.fm Page 69 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

УДК 629.735:621.787.6

Г. Н. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук, К. Г. КРАВЧЕНКО (МАИ), e-mail: gnkrav@mail.ru

Обоснование эффективности восстановления усталостной долговечности поверхностно-упрочненных авиационных деталей повторным упрочнением дробью

Дано обоснование восстановления усталостной долговечности силовых деталей авиационных конструкций из высокопрочных материалов повторной дробеструйной обработкой в условиях многоцикловой усталости.

Ключевые слова: дробеструйное упрочнение, усталостная долговечность, повторное упрочнение, поверхностный слой, фазовый состав, остаточные напряжения, циклическая наработка.

The rationale for restoring the fatigue life of structural parts of aircraft structures from high-strength materials by repeated shot peening under conditions of multi-cycle fatigue is given.

Keywords: shot peening, fatigue life, re-hardening, surface layer, phase composition, residual stresses, cyclic operating time.

Эффективность методов поверхностного пластического деформирования (ППД) в повышении усталостной прочности и долговечности силовых деталей авиационных конструкций хорошо известна, подробно изучена и всесторонне экспериментально доказана. В последние десятилетия методы ППД успешно применяют для восстановления усталостной долговечности силовых деталей при эксплуатации и ремонте. Эффективность такого восстановления обусловлена существенным улучшением в процессе упрочнения механических свойств и напряженно-деформированного состояния (НДС) поверхностного слоя материала, положительными изменениями его тонкой структуры, а также возможным улучшением микрорельефа поверхности. Определенное значение имеет также эффект "залечивания" или "омолаживания" тонкого поверхностного слоя с усталостными микротрещинами, появляющимися во время эксплуатации. Для устранения микротрещин с удалением тонкого поверхностного слоя толщиной $\approx 10 \div 80$ мкм разработаны технологические процессы, основанные на механическом или электролитическом полировании, а также на абразивной или пескоструйной обработке поверхностей деталей, иногда в сочетании с методами ППД. Высокую эффективность повторное упрочнение методами ППД показало при восстановлении усталостной долговечности силовых авиационных деталей из высокопрочных материалов, упрочненных методами ППД в процессе производства и отработавших более половины технического ресурса [1—3].

Для количественной оценки эффективности нескольких последовательных повторных упрочнений экспериментально исследовали цилиндрические образцы из стали 30ХГСН2А. Исходную поверхность неупрочненных образцов получили точением с дальнейшим полированием до шероховатости $Ra = 0{,}32$ мкм. Чтобы исключить влияние шероховатости на усталостную прочность упрочненных образцов, их поверхность после первой и последующих обработок дробью полировали также до этого параметра шероховатости. Упрочнение осуществляли стальной дробью ∅1 мм на пневмодробеструйной установке. Усталостные испытания и циклическую наработку проводили при нагружении изгибом с вращением и амплитуде напряжений $\sigma_a = 800$ МПа. Всего испытали 30 образцов. Результаты испытаний показали следующее (табл. 1):

первоначальное упрочнение дробью повышает усталостную долговечность точеных образцов более чем в 4 раза, повторное упрочнение после наработки 300 тыс. циклов, составляющих 75 % от среднего числа $\overline{N}_{раз}$ циклов до разрушения однократно упрочненных образцов, повышает долговечность в 10 раз без учета продолжительности самой наработки;

Таблица 1

Серия образцов	Обработка поверхности	Среднее число $N_{раз}$, тыс. циклов, до разрушения
1	Точение	82
2	Точение + ДУ	400
3	Точение + ДУ + + НАР1 + ДУ	4100 4300 с учетом НАР
4	Точение + ДУ + НАР1 + + ДУ + НАР2 + ДУ	5800 7800 с учетом НАР

Примечание. ДУ — дробеструйное упрочнение; НАР1 и НАР2 — наработка соответственно $3 \cdot 10^5$ и $2 \cdot 10^6$ циклов.

второе повторное упрочнение дробью, после второй циклической наработки продолжительностью 2 млн циклов, составляющей 50 % от $\overline{N}_{раз}$ повторно упрочненных образцов, повышает долговечность более чем в 10 раз, а с учетом продолжительности наработки — почти в 20 раз, относительно однократно упрочненных образцов (после токарной обработки).

Отметим, что такая высокая эффективность повторного поверхностного упрочнения отмечается не во всех исследованиях и не при всех применяемых методах ППД. Однако указанная тенденция не только полного восстановления усталостной долговечности после повторного упрочнения, но и существенного превышения долговечности однократно упрочненных образцов и деталей стабильно подтверждается во всех проведенных исследованиях (при условии правильного назначения технологических режимов обработки ППД).

Известно, что эффективность методов ППД в повышении сопротивлению усталости деталей машин и механизмов подтверждена и объяснена во многих исследованиях отечественных и зарубежных специалистов. В то же время исследований, объясняющих эффект повторных поверхностных упрочнений, практически нет, а в проведенных исследованиях, как правило, констатируется только сам факт повышения усталостной долговечности с изучением, в лучшем случае, НДС поверхностного слоя, твердости и шероховатости.

В данной работе с целью объяснения и обоснования высокого эффекта повторного поверхностного упрочнения экспериментально исследовали свойства поверхностного слоя материала, его структуру, фазовый состав и напряженное состояние на разных этапах его формирования и изменений в процессе производства, эксплуатационной циклической наработки и повторного упрочнения. Исследования направлены на достижение высокого и стабильного эффекта восстановления усталостной долговечности поверхностно-упрочненных деталей повторным поверхностным упрочнением путем выбора оптимальных технологических параметров и режимов ППД при первоначальном и повторных упрочнениях, а также назначения рациональной продолжительности эксплуатации (наработки) перед восстановлением повторным упрочнением. Полученные результаты должны способствовать оптимальному проектированию технологических процессов ППД при их применении на различных этапах жизненного цикла авиационных конструкций.

Экспериментально исследовали образцы из высокопрочных материалов — стали 30ХГСН2А и частично из титанового сплава ВТ22, изготовленных по технологиям авиационного производства. Круглые образцы имели рабочее сечение ∅7,5 мм, а плоские — сечение 3,5 × 7,5 мм. Для окончательной механической обработки поверхности образцов из стали 30ХГСН2А использовали шлифование (с последующим отпуском) до параметра Ra = 0,40 мкм, а из сплава ВТ22 — чистовое точение (чистовое фрезерование) до параметра Ra = 0,55 мкм. Поверхностное упрочнение образцов осуществляли на пневмодробеструйной установке дробью диаметром от 0,1 до 2 мм при давлении воздуха, обеспечивающим оптимальную скорость полета дроби ≈15÷25 м/с [4].

Усталостные испытания проводили на магнитно-резонансной установке М-100 с нагружением консольным изгибом при частоте ≈70÷100 Гц и на испытательной машине МУИ-6000 при нагружении изгибом с вращением с частотой 60 Гц. Указанные частоты при усталостных испытаниях соответствуют эксплуатационному нагружению многих силовых деталей планера самолета, например взлетно-посадочных устройств [5], и соответствуют зоне многоцикловой усталости. Для построения диаграмм растяжения–сжатия использовали испытательные машины MTS и Shimadzu.

Очевидно, что высокая эффективность повторного дробеударного упрочнения связана с изменениями свойств пластически деформированного дробью поверхностного слоя материала при циклическом нагружении. Поэтому в исследованиях основной акцент сделали именно на эти изменения.

При циклическом нагружении материал может упрочняться или разупрочняться. Для высокопрочных материалов это определяется: его структурой и фазовым составом; степенью пластической деформации при предварительной технологической обработке; уровнем и продолжительностью циклического нагружения. Наиболее интенсивно эти процессы проходят при наработке до $10^3 \div 10^4$ циклов [6]. Испытания гладких образцов на машине MTS при жестком нагружении в упругопластической области показали, что начиная со второго симметричного цикла нагружения растяжением–сжатием амплитуда нагрузки увеличивается для стали 30ХГСН2А на 8÷10 % и для сплава ВТ22 — на 3÷5 %, что свидетельствует о циклическом упрочнении этих материалов. При последующих циклах амплитуда нагрузки увеличивается незначительно.

Изменения механических свойств и степени наклепа поверхностного слоя материала при упрочнении дробью и циклическом нагружении оценивали по изменению его микротвердости HV, которую измеряли послойно на косых шлифах, вырезанных из образцов, на микротвердомере Виккерс ZHV1-M с нагрузкой 100 гр. Из полученных зависимостей микротвердости HV (на глубине 10 мкм от поверхности) от циклической наработки $N_{нар}$ образцов, приведенных на рис. 1, следует, что после первого упрочнения дробью микротвердость увеличилась на ≈8÷10 %, а после повторного еще на ≈5÷6 % относительно исходного неупрочненного состояния. В результате циклической наработки микротвер-

ve1219.fm Page 71 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

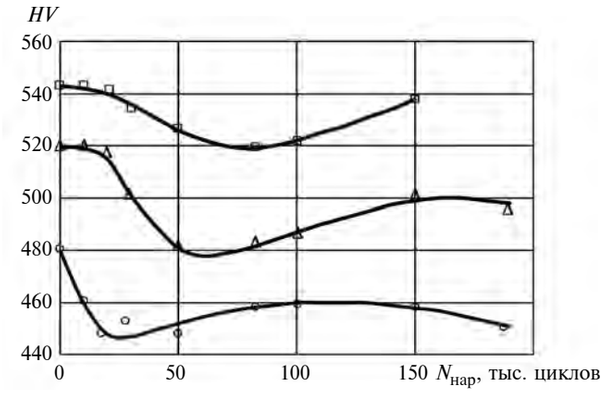


Рис. 1. Зависимости микротвердости *HV* от числа $N_{нар}$ циклов нагружения образцов из стали 30ХГСН2А:

○ — неупрочненные образцы, σ_a = 750 МПа; Δ — дробеструйное упрочнение, σ_a = 800 МПа; □ — повторное упрочнение дробью после предварительной наработки 80 тыс. циклов, σ_a = 800 МПа

дость неупрочненных образцов уже с первых циклов нагружения снизилась на ≈7 %, а упрочненных дробью практически не изменялась до 50÷100 циклов нагружения и только после наработки 60÷80 тыс. циклов снизилась на 10 %. Такие изменения микротвердости поверхностного слоя неупрочненных образцов наблюдались до глубины ≈30 мкм, а упрочненных — до 300 мкм. После наработки ≈100 тыс. циклов для всех рассматриваемых вариантов обработки поверхности наблюдалось увеличение микротвердости приблизительно на 3 %.

При соударении дроби с деталью поверхностный слой материала в зоне контакта подвергается двухосному пластическому растяжению в плоскости, перпендикулярной к направлению удара, и пластическому сжатию в направлении удара. После отскока дроби растянутые слои сначала разгружаются, а затем сжимаются, что обусловлено неравномерностью пластической деформации материала по толщине поверхностного слоя и силовым воздействием глубже расположенных и менее деформированных слоев материала на слои, расположенные ближе к поверхности детали. Поэтому поверхностный слой материала нагружается по циклической схеме растяжение–разгрузка–сжатие и в результате возникают остаточные сжимающие напряжения. При многократных ударах дроби по одному и тому же участку детали в зоне контакта происходит многократное циклическое деформирование поверхностного слоя материала по указанной выше схеме. Формирование остаточных напряжений при упругопластическом деформировании поверхностного слоя материала ударами дроби определяется во многом его пределом текучести при растяжении—сжатии.

Влияние обработки дробью и циклического нагружения на условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ поверхностного слоя исследовали при нагружении гладких образцов из стали 30ХГСН2А консольным изгибом, которое было выбрано специально из-за возможности регистрации начала пластического течения в поверхностном слое материала. Далее условный предел текучести $\bar{\sigma}_{0,2}$ дается в относительных величинах. Циклическое нагружение осуществляли на машине М100, а статическое нагружение с записью диаграммы нагрузка—перемещение — на машине Shimadzu (без снятия образца с машины).

При статическом нагружении по циклу растяжение—разгрузка—сжатие (без предварительного циклического нагружения) испытали пять серий образцов: 1 — шлифованные; 2 — упрочненные дробью ∅2 мм из стали ШХ 15 при давлении воздуха 0,4 МПа; 3 — упрочненные и термообработанные при 180÷200 °С в течение 5 ч; 4 и 5 — упрочненные аналогично серии 2, но только с одной продольной половины поверхности образца.

Экспериментальные данные, приведенные в табл. 2, показывают, что после обработки шлифованных образцов дробью условный предел текучести $\bar{\sigma}_{0,2}$ при растяжении поверхностного слоя уменьшился в среднем на 15 %, а после низкого отпуска восстановился до исходного значения. Условный предел текучести поверхностного слоя шлифованных образцов при обратном нагружении (сжатии после растяжения) уменьшился на 25÷30 % (по сравнению с пределом текучести при растяжении), а образцов, упрочненных дробью, только на 15÷20 %.

Так как эти результаты получены при испытании образцов на изгиб, то для их подтверждения необходимо точно знать в какой зоне (растяжения или сжатия) изначально начинается пластическая деформация. Результаты испытаний образцов серий 4 и 5, упрочненных только с одной продольной стороны, подтвердили правильность установлен-

Таблица 2

Серия образцов	Обработка поверхности	Число образцов	Относительная величина $\bar{\sigma}_{0,2}$	
			при растяжении относительно $\sigma_{0,2}$ шлифованных образцов	при сжатии после растяжения относительно $\sigma_{0,2}$ при растяжении
1	Шлифование	8	1,0	0,70÷0,75
2	Шлифование + + ДУ	8	0,85	0,80÷0,85
3	Шлифование + + ДУ + отпуск	5	1,0	–
4	Шлифование + + ДУ (в области сжатия)	5	1,0	0,70÷0,75
5	Шлифование + + ДУ (в области растяжения)	5	0,85	0,80÷0,85

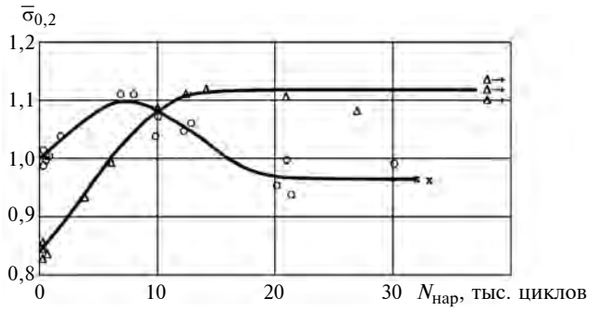


Рис. 2. Зависимости условного предела $\bar{\sigma}_{0,2}$ текучести поверхностного слоя стали 30ХГСН2А от числа $N_{нар}$ циклов нагружения:

○ — шлифование; Δ — шлифование + упрочнение дробью; × и Δ→ — разрушенные и неразрушенные образцы

ных изменений условного предела текучести. На основании анализа полученных результатов снижение условного предела текучести $\bar{\sigma}_{0,2}$ поверхностного слоя материала после упрочнения дробью можно объяснить эффектом Баушенгера, что хорошо согласуется с описанной выше схемой циклического нагружения поверхностного слоя материала в зоне соударения с дробью и моделью возникновения остаточных сжимающих напряжений.

Результаты исследования влияния продолжительности циклического нагружения $N_{нар}$ на относительный предел текучести $\bar{\sigma}_{0,2}$ (относительно исходного предела текучести поверхностного слоя шлифованных образцов) приведены на рис. 2. При циклическом нагружении и последующем статическом нагружении по циклу растяжение—разгрузка испытали 15 образцов со шлифованной поверхностью и 17 образцов, упрочненных дробью. Циклическое нагружение образцов из стали 30ХГСН2А проводили при амплитуде нагружения $\sigma_a = 800$ МПа. Из графика видно, что и шлифованным, и упрочненным дробью образцам в начале циклического нагружения свойственно упрочнение. Максимальное увеличение $\bar{\sigma}_{0,2}$ у шлифованных образцов на ≈10 %, а упрочненных дробью на ≈25 % наблюдается после 8÷10 тыс. циклов нагружения. При этом их абсолютные величины становятся примерно равными. Дальнейшее циклическое нагружение приводит к постепенному разупрочнению поверхностных слоев шлифованных образцов и к стабилизации $\bar{\sigma}_{0,2}$ упрочненных дробью образцов. При числе циклов нагружения $N_{нар} > 20$ тыс. значение $\sigma_{0,2}$ у шлифованных образцов становится примерно равным исходному значению, а у образцов, упрочненных дробью, после $N_{нар} > 10$ тыс. циклов $\sigma_{0,2}$ становится на ≈25 % выше своего исходного значения и на ≈15 % выше, чем у шлифованных образцов (при той же наработке), и остается таким при дальнейшем нагружении вплоть до разрушения образца.

Остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое материала, создаваемые дробеструйной обработкой, располагаются на глубине от 0,1 до 0,8 мм в зависимости от материала детали, диаметра и скорости дроби. Эти напряжения под действием переменного нагружения перераспределяются и уменьшаются по величине в зависимости от внешних условий, продолжительности и уровня нагружения, что отмечено в работах [1, 7]. Динамику максимальных остаточных напряжений $\sigma_{ост}^{max}$ и их распределение в поверхностном слое при чередовании дробеструйного упрочнения и циклической наработки исследовали с использованием рентгеновского анализатора Strainflex-MSF в хромовом излучении при послойном удалении материала с упрочненной поверхности образцов. Некоторые результаты приведены в табл. 3, из которой следует, что циклическая наработка стальных образцов $N_{нар} = 80$ тыс. циклов при амплитуде $\sigma_a = 800$ МПа привела к снижению остаточных напряжений $\sigma_{ост}^{max}$ в упрочненной поверхности примерно на 20 %. Повторное упрочнение дробью после циклической наработки увеличивает как глубину $\delta_{пл}$ залегания остаточных сжимающих напря-

Таблица 3

Серия образцов	Состояние поверхности	30ХГСН2А				ВТ22		
		$\sigma_{ост}^{max}$, МПа	δ_{σ}^{max}, мкм	$\delta_{пл}$, мкм	*HV*	$\sigma_{ост}^{max}$, МПа	δ_{σ}^{max}, мкм	$\delta_{пл}$, мкм
1	Исходная поверхность	−80	20	140	480	−300	30	110
2	ИСХ + ДУ	−700	85	320	520	−420	30	185
3	ИСХ + ДУ + НАР1	−550	100	300	485	−350	30	140
4	ИСХ + ДУ + НАР1 + ДУ	−850	120	400	542	−550	75	270
5	ИСХ + ДУ + НАР2 + ДУ	−900	125	420	—	−570	80	280
6	ИСХ + ДУ + НАР1 + ДУ + НАР3	−720	120	400	—	—	—	—

Примечания. 1. Для образцов из 30ХГСН2А исходная обработка поверхности — шлифование, $\sigma_a = 800$ МПа, НАР1 = = 80 тыс. циклов, НАР2 = 150 тыс. циклов, НАР3 = 140 тыс. циклов.

2. Для образцов ВТ22 исходная обработка — чистовое точение, $\sigma_a = 550$ МПа, НАР1 = 120 тыс. циклов, НАР2 = 220 тыс. циклов.

3. Максимальные остаточные сжимающие напряжения $\sigma_{ост}^{max}$ на глубине δ_{σ}^{max} от поверхности.

4. Глубина $\delta_{пл}$ распространения остаточных сжимающих напряжений.

5. Микротвердость *HV* на глубине 10 мкм.

жений примерно на 25 %, так и их максимальную величину на 20 % (по сравнению с первым упрочнением) при небольшом смещении максимума $\sigma_{ост}^{max}$ вглубь. Чем продолжительнее циклическая наработка (НАР2 соответствует началу образования усталостной трещины), тем больше проявляется указанная тенденция изменения эпюр остаточных напряжений. Аналогичные зависимости влияния циклической наработки и дробеструйного упрочнения на распределение в поверхностном слое остаточных сжимающих напряжений получены также на образцах из сплава ВТ22 (см. табл. 3).

Более благоприятное формирование остаточных сжимающих напряжений при повторном упрочнении дробью с увеличением максимального значения $\sigma_{ост}^{max}$ и глубины распространения на $\delta_{пл} \approx 20 \div 25$ % можно объяснить повышением условного предела текучести $\bar{\sigma}_{0,2}$ на 15 % и уменьшением твердости *HV* на ≈10 % пластически деформированного при первом упрочнении поверхностного слоя под воздействием циклического нагружения.

Известно [6, 8], что пластическая деформация и циклическое нагружение материала могут существенно изменить характеристики его тонкой структуры: фазовый состав, плотность и ширину дислокаций, уровень искажений кристаллической решетки и локальных микронапряжений и др. Эти изменения, наряду с другими факторами, также могут отвечать за высокую эффективность именно повторного поверхностного упрочнения. Указанные изменения исследовали на образцах из стали 30ХГСН2А с помощью рентгеноструктурного анализатора Дрон-4 в железном излучении. Измерения проводили как на поверхности образцов, так и на глубине 0,1 мм от поверхности после их электрополирования. Первое упрочнение осуществляли дробью ∅1 мм, повторное — дробью ∅0,5 мм. Циклическую наработку проводили при амплитуде напряжений σ_a = 800 МПа в течение 70 и 150 тыс. циклов. Результаты исследований приведены в табл. 4.

Анализ рентгенограмм показал, что первое упрочнение дробью практически не изменяет фазовый состав поверхностного слоя стали, а циклическая наработка вызывает заметный распад как остаточного аустенита, так и частично мартенситной фазы, и тем интенсивнее, чем больше число циклов нагружения. Остаточный аустенит распадается интенсивнее на поверхности образцов, чем на глубине 0,1 мм, что связано с большими циклическими напряжениями на поверхности при нагружении образцов изгибом. Повторное упрочнение дробью приводит к окончательному распаду остаточного аустенита на поверхности и дальнейшему уменьшению его содержания на глубине. В этом случае менее интенсивный распад аустенита на глубине можно объяснить тем, что повторное упрочнение осуществлялось дробью меньшего диаметра и, следовательно, степень пластической деформации на глубине была не так велика. Распад мартенсита сопровождается уменьшением тетрагональности решетки, что приводит к относительно большему сужению рентгеновской линии (200) по сравнению с линией (211). Следовательно, на распад мартенсита указывает увеличение отношений β(211)/β(200). Обработка дробью при первом и повторном упрочнениях вызывает весьма незначительный распад мартенсита, который происходит в основном под действием циклического нагружения.

Фазовые превращения остаточного аустенита в мартенсит приводят к повышению прочности стали. В то же время мартенситной структуре свойственна значительная неоднородность локальных микронапряжений при высоком общем уровне микроискажений кристаллической решетки, что приводит к раннему проявлению микротекучести и склонности к хрупкому и усталостному разрушениям [8]. Так как удельный объем мартенсита больше, чем аустенита, то распад аустенита сопровождается изменением объемно-напряженного состояния поверхностного слоя и, как следствие, появлением

Таблица 4

Серия образцов	Обработка поверхности	Содержание остаточного аустенита, %	Степень распада мартенсита на поверхности, β(211)/β(200)	Степень наклепа и выравнивания микронапряжений		Повышение удельного сопротивления поверхностного слоя, ом · см · 10^6
				β(220), 10^3 рад	β(220)/β(110)	
1	Шлифование	12/12	1,07	25,6/25,6	3,1/3,1	0
2	Шлифование + ДУ1	10/11	1,09	25,6/23,6	3,1/2,9	10
3	Шлифование + ДУ1 + НАР1	6/10	1,24	21,2/21,9	2,6/2,6	14
4	Шлифование + + ДУ1 + НАР1 + ДУ2	Следы/8	1,26	23,5/20,4	2,8/2,5	20
5	Шлифование + + ДУ1 + НАР2 + ДУ2	Нет/5	1,27	22,6/18,4	2,7/2,2	22

Примечания: 1. ДУ1 и ДУ2 — дробеструйное упрочнение дробью соответственно ∅1 мм и ∅0,5 мм. 2. НАР1 и НАР2 — циклическая наработка продолжительностью соответственно 70 и 150 тыс. циклов (до разрушения образца). 3. В числителе приведены данные для поверхности , в знаменателе — на глубине 0,1 мм .

ve1219.fm Page 74 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

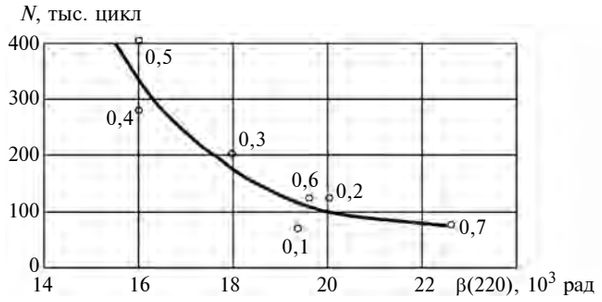


Рис. 3. Зависимость средней циклической долговечности *N* стальных образцов и ширины 220 рентгеновской линии от режимов пневмодробеструйного упрочнения дробью ∅3 мм:
цифры около экспериментальных точек — давление воздуха в МПа

остаточных сжимающих напряжений. Распад мартенсита сопровождается образованием мелкодисперсных карбидных частиц, блокирующих плоскости скольжения, что ведет к некоторому упрочнению материала.

При поверхностном пластическом деформировании, с одной стороны, происходит наклеп стали, связанный с ростом плотности дислокаций и вызывающий увеличение ширины рентгеновских линий, с другой стороны, релаксация локальных пиковых микронапряжений в кристаллической решетке вызывает уменьшение ширины рентгеновских линий. Локальные релаксационные процессы, выравнивающие микронапряжения, уменьшают ширину рентгеновских линий, как правило, более значительно, чем они расширяются в результате наклепа. Поэтому вклад дробеструйной обработки в упрочнение, вносимый уменьшением локальных микронапряжений, можно косвенно оценить по степени уменьшения ширины рентгеновских линий [8]. Степень уменьшения локальных микронапряжений и изменения структуры в результате повышения плотности дислокаций оценивали по результатам измерения линии (220) мартенситной фазы в области больших углов отражения и по отношению ширины линий β(220)/β(110). Результаты измерений показали, что после шлифования поверхностный слой стали 30ХГСН2А имеет высокие степень микроискажений кристаллической решетки и неоднородность локальных микронапряжений. Первое упрочнение не вызывает заметного изменения структуры как на поверхности, так и на глубине 0,1 мм. В результате циклического нагружения происходит релаксация локальных микронапряжений, и более значительно при его большой длительности. Повторное упрочнение способствует дальнейшему уменьшению среднего уровня микронапряжений и неоднородности микроискажений. При уменьшении пиковых напряжений сопротивление усталости мартенситной стали значительно повышается, что показывает зависимость циклической долговечности образцов из стали 30ХГСН2А от ширины рентгеновской линии (220), полученная экспериментально при разных режимах дробеструйного упрочнения (рис. 3) [9].

Для оценки изменения дислокационной структуры поверхностного слоя образцов их удельное сопротивление исследовали на приборе Ф-415. Увеличение удельного сопротивления поверхностного слоя связано с увеличением плотности дислокаций, затрудняющих движение электронов проводимости. В табл. 4 приведены результаты, показывающие увеличение плотности дисклокаций после первого дробеструйного упрочнения. Циклическое нагружение и повторное дробеструйное упрочнение способствуют дальнейшему увеличению их плотности.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Высокая эффективность повторного упрочнения стали 30ХГСН2А в повышении усталостной долговечности обусловлена большими величиной и глубиной распространения остаточных сжимающих напряжений первого рода по сравнению с первым упрочнением, повышением микротвердости поверхностного слоя и существенными изменениями фазового состава, его тонкой и дислокационной структур.

2. Циклическое нагружение стали 30ХГСН2А перед повторным упрочнением интенсифицирует положительные структурно-фазовые превращения в поверхностном слое при его повторном пластическом деформировании: распад остаточного аустенита и мартенситной фазы с выделением карбидных частиц; снижение деформационной неоднородности структуры; повышение плотности дислокаций и др.

3. Повышение остаточных сжимающих напряжений после повторного упрочнения связано с увеличением условного предела $\bar{\sigma}_{0,2}$ текучести и толщины деформированного поверхностного слоя.

4. Различное изменение свойств поверхностного слоя при циклическом нагружении шлифованных и упрочненных дробью образцов объясняется влиянием предварительной пластической деформации (ударами дроби) на циклическое упрочнение или разупрочнение материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Эффективность** повторного упрочнения высокопрочных конструкционных материалов 30ХГСН2А и ВТ22 / Б. В. Бойцов, Б. П. Рыковский, Г. Н. Кравченко и др. // Вестник машиностроения. 1981. № 3. С. 12, 13.

2. **Кравченко Г. Н.** Повышение долговечности деталей повторным дробеструйным упрочнением // Надежность и контроль качества. 1991. № 10. С. 12—14.

3. **Кравченко Г. Н., Зенушкин В. Н., Синьковский Н. М.** Восстановление долговечности силовых деталей самолета повторным поверхностным пластическим деформированием // Тр. МИИ ГА "Эффективность процессов восстановления авиационной техники ГА". 1985. С. 17—21.

ve1219.fm Page 75 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 330.34

Ю. П. КАЛМЫКОВ, канд. экон. наук (Финансовый университет при Правительстве РФ), e-mail: JKalmykov@fa.ru

Проблемы и перспективы развития автомобильной промышленности в России

Исследованы состояние и перспективы развития отечественной автомобильной промышленности. Рассмотрены действующий механизм стимулирования повышения технического уровня выпускаемой продукции, модернизации технико-технологической базы предприятий и увеличения экспорта автомобилей в свете реализации основных направлений деятельности Правительства РФ на период до 2024 г. и национальных проектов.

Ключевые слова: машиностроение, автомобильная промышленность, конкурентоспособность, импортозависимость, федеральный бюджет, субсидии, экспорт.

The state and development prospects of the domestic automobile industry are investigated. The current mechanism for stimulating an increase in the technical level of manufactured products, modernization of the technical and technological base of enterprises and an increase in car exports in conditions of the implementation of the main directions of the Government of the Russian Federation for the period until 2024 and national projects are considered.

Keywords: mechanical engineering, automobile industry, competitiveness, import dependence, federal budget, subsidies, export.

Автомобильная промышленность России относится к высокотехнологичным отраслям транспортного машиностроения. В Основных направлениях деятельности Правительства Российской Федерации на период до 2024 года от 29 сентября 2018 г. (далее ОНДП), принятых во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204, записано: "Правительство Российской Федерации примет активные меры по стимулированию развития высокотехнологичных отраслей, к которым относится... транспортное машиностроение".

Особое внимание и государственная поддержка в развитии автомобилестроения в ОНДП уделяются таким ключевым задачам, как:

освоение и выпуск на рынок продуктов с новыми электросиловыми агрегатами, автономное вождение, подключенный автотранспорт и газомоторная техника;

послепродажное обслуживание колесных транспортных средств;

создание необходимой инженерной и транспортной инфраструктуры.

Сегодня отечественное автомобилестроение представлено предприятиями по производству легковых, в том числе коммерческих, автомобилей, грузовых и специальных автомобилей, автобусов, а также автомобильных компонентов. В отрасли созданы и функционируют свыше 400 тыс. рабочих мест для высококвалифицированных работников и более 1 млн рабочих мест в зависимых и дилерских компаниях. Очень важен мультипликативный эффект развития автомобильной промышленности для смежных отраслей экономики: спрос на автомобили повышает потребность в высокотехнологичной продукции металлургической, химической, электротехнической и других отраслей, обеспечивая занятость в них более 3,5 млн человек.

Автомобилестроение вносит значительный вклад в формирование доходной базы федераль-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 69)

4. **Кравченко Г. Н., Кравченко К. Г.** Выбор технологических параметров дробеударного упрочнения силовых деталей авиационных конструкций // Полет. 2018. № 12. С. 37—44.

5. **Бойцов Б. В.** Прогнозирование долговечности тяжелонагруженных конструкций. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.

6. **Головин С. А., Пушкар А.** Микропластичность и усталостность металлов. М.: Металлургия, 1980. 239 с.

7. **Бойцов Б. В., Кравченко Г. Н., Петухов Ю. В.** Изменение качества поверхности упрочненных авиационных деталей при эксплуатации // Авиационная промышленность. 2015. № 2. С. 55—59.

8. **Балтер М. А.** Упрочнение деталей машин. М.: Металлургия, 1978. 183 с.

9. **Зенушкин В. Н., Алексеев В. В., Кравченко Г. Н.** Исследование связи физико-механического состояния поверхностного слоя после поверхностного пластического деформирования с изменением усталостной прочности конструкционных материалов // Научно-металлические материалы по восстановлению авиационной техники. М.: ВВИА, 1983. С. 124—131.

ного бюджета, а также влияет на создание денежных фондов в организациях, связанных с финансовым сопровождением автомобильного бизнеса, в том числе с обязательным и добровольным страхованием, оказанием платных услуг по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей, лизингом (каршерингом) автомобилей, предоставлением потребительских кредитов банками и др.

Для проведения НИОКР в отрасли существуют научно-исследовательские и проектно-конструкторские организации, как, например, федеральный научно-исследовательский автомоторный институт (НАМИ). В автомобильной промышленности действуют 430 крупных, средних и малых предприятий, из которых 44,2 % специализируются на производстве автомобилей и их обслуживании, а 55,8 % на изготовлении автокомпонентов: двигателей, коробок перемены передач (КПП), трансмиссий, автотракторного электрооборудования, автомобильной электроники и др.

В уставном капитале юридических лиц, занимающихся экономической деятельностью в автомобилестроении, на долю коммерческих организаций и физических лиц приходится 81,9 %, а на долю государственного участия — 9,5 %. Заметная доля в капитале автопроизводителей (8,6 %) приходится на некоммерческие организации. Это обусловлено внесением государственного пакета акций ряда предприятий отрасли в имущество государственной корпорации "Ростехнологии".

Автомобилестроение имеет значительный потенциал для своего развития, так как на 1000 человек населения России приходится 297 легковых автомобилей, что значительно меньше, чем во многих развитых и развивающихся странах. Достаточно большая часть автомобильного парка страны имеет большой срок эксплуатации и требует замены.

До перехода на рыночные условия хозяйствования автомобильная промышленность России по производству легковых автомобилей занимала пятое место в мире после Японии, США, ФРГ и Франции, по производству грузовиков — третье место в мире, а по производству автобусов — первое. По сравнению с развивающимися странами Россия была абсолютным лидером. Так, объемы производства автомобилей в России в 1990 г. были в 1,5 раза больше по сравнению с Южной Кореей, в 2,2 раза — с Бразилией, в 4 раза — с Китаем и в 5,6 раза — с Индией. В рыночных условиях отрасль оказалась в глубоком затяжном кризисе: производство автомобилей сократилось почти в 2 раза, в том числе выпуск грузовых автомобилей в 5 раз, а легковых автомобилей и автобусов более чем на 20 %. Основными причинами этого явились: низкий технический уровень выпускаемой продукции; изношенность производственной инфраструктуры; большие операционные издержки; содержание на балансе предприятий многочисленных социальных объектов. Кроме того, еще не были нормативно определены и задействованы таможенное регулирование и другие меры государственной поддержки автомобилестроения.

Эти и другие факторы способствовали утрате конкурентоспособности отечественных автомобилей, тяжелому финансовому положению автопроизводителей и даже банкротству ряда крупных предприятий. Для удовлетворения растущих потребностей населения в легковых автомобилях в Россию ежегодно стали ввозиться из-за рубежа сотни тысяч легковых автомобилей, из которых более 1/3 были подержанными. Если в 2001 г. иномарки составляли 42 % от произведенных в стране автомобилей, то в 2004 г. — уже 61 %. По существу, одна из крупнейших в мире стран — производителей автомобильной техники, превратилась в страну — импортера подержанных автомобилей.

Правительство РФ с целью предотвращения риска существования отечественного автомобилестроения приняло ряд чрезвычайных мер по государственной поддержке развития отрасли.

Во-первых, Постановлением № 166 от 29.03.2005 года на территории России был введен режим "промышленной сборки" зарубежных автомобилей, обеспечивающий трансферт современных научно-исследовательских работ и производственных технологий.

Во-вторых, в качестве стимула для локализации производства приняли решение об освобождении иностранных автопроизводителей от таможенных пошлин на период до 7 лет после заключения ими с Минпромторгом соглашений о сотрудничестве на ввоз в страну автокомпонентов, включая такие сложные узлы, как двигатели, КПП, трансмиссию. Нововведением стало использование в режиме "промышленной сборки" методов "сетевого маркетинга": автопроизводители обязывались "привести" на рынок производителей компонентов. Эти меры позволили обеспечить приток в страну инвестиций в объеме 230 млрд руб. и создать 50 тыс. высокопроизводительных рабочих мест.

В-третьих, Правительство РФ Постановлением № 328 от 15.04.2014 года утвердило программу развития автомобильной промышленности на 2012—2020 гг., предусматривающую ежегодное предоставление отрасли из федерального бюджета адресных субсидий для стимулирования:

инвестиций на модернизацию производственной инфраструктуры;

спроса физических и юридических лиц на отечественные автомобили;

части операционных (переменных) и постоянных затрат для обеспечения конкурентоспособности отечественных автомобилей;

создания новой перспективной автомобильной техники и базы для производства ее компонентов;

ve1219.fm Page 77 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

продвижения продукции автомобильной промышленности на рынки стран СНГ и дальнего зарубежья;

обновления текущего автомобильного парка России.

За 2012—2017 гг. на поддержку автомобильной промышленности из федерального бюджета научным центрам и предприятиям отрасли были выделены бюджетные субсидии в сумме 354 922 463,5 тыс. руб. Структурный анализ их использования показал: большая часть средств (75,69 %) направлена на стимулирование спроса на внутреннем автомобильном рынке; на инвестиционную деятельность, субсидирование НИР и ОКР и стимулирование экспорта использовано соответственно 10,4, 13,3 и 0,6 %; на утилизацию устаревших и изношенных автомобилей направлено менее 1 %.

Предоставление субсидий из федерального бюджета на развитие автомобильной промышленности в сочетании с мерами по введению режима "промышленной сборки" автомобилей позволило:

1) многократно увеличить объем производства иномарок российской сборки и кардинально повлиять на улучшение структуры рынка легковых автомобилей, заметно потеснив на нем долю автомобилей, поступающих по импорту, что видно из данных, приведенных в табл. 1 и 2;

Таблица 1

Производство, тыс. шт., иномарок российской сборки по годам

Автомобили	2002 г.	2005 г.	2010 г.	2012 г.	
				Число	Относительно 2005 г.
Легковые	10,8	108,2	589,9	1262,0	11,7
Грузовые	—	2,9	16,9	30,9	10,6
Автобусы	—	0,39	8,5	30,9	79,2
Всего	10,8	111,49	615,3	1323,8	11,9

Таблица 2

Удельный вес, %, импортных и произведенных в России автомобилей по годам

Легковые автомобили	2001 г.	2004 г.	2012 г.
Отечественные	68	30	21
Иномарки, произведенные в России	0	9	45
Импорт	32	61	34
Всего автомобилей	100	100	100

Таблица 3

Выпуск, тыс. шт., автомобилей во всех сегментах по годам

Автомобили	1995 г.	2009 г.	2012 г.		
			Число	Коэффициент отношения относительно	
				1995 г.	2009 г.
Легковые	835	600	1964	2,3	3,3
Грузовые	142	91,7	212	1,5	2,3
Автобусы	39,8	35,5	58,6	1,5	1,6
Итого	1016,8	727,2	2234,6	2,2	3,1

Таблица 4

Динамика производства, тыс. шт., автомобилей во всех сегментах по годам

Автомобили	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Легковые	1964	1925	1695	1215	1100
Грузовые	212	207	153	128	137
Автобусы	58,6	53,2	44,0	36,4	43,2
Итого	2234,6	2185,2	1892	1379,4	1280,2
Выпуск автомобилей, % к 2012 г.:					
всего	100	97,8	84,7	61,7	57,3
легковых	100	98,0	86,3	61,8	56,0

Таблица 5

Соотношения продаж, тыс. шт., автомобилей на отечественном рынке в 2012 г. и 2016 г.

Год	Легковые автомобили	Легкие коммерческие автомобили	Грузовые автомобили	Автобусы	Всего
2012	2740	190,5	137,5	18,3	3086,3
2016	1310	117,0	65,4	12,6	1505,0
Изменение продаж в 2016 г. в % к 2012 г.	47,8	61,4	47,6	68,9	48,8

2) преодолеть спад производства продукции в отрасли в 1990—2005 гг. и в период экономического кризиса 2008—2010 гг.: выпуск автомобилей по всем сегментам в 2012 г. превысил выпуски 1995 г. и 2009 г. соответственно в 2,2 и 3,1 раза, а легковых автомобилей соответственно в 2,3 и 3,3 раза (табл. 3);

3) повысить качество отечественной автомобильной продукции и технологию ее производства: более 60 % производимых в настоящее время моделей легковых автомобилей спроектированы на базе автомобильных платформ, отвечающих мировым трендам, с уровнем локализации 50 % и выше.

Однако с 2013 г. выпуск автомобильной техники, в том числе легковых автомобилей, начал снижаться. Особенно большое снижение производства пришлось на 2016 г. (табл. 4).

Анализ показал, что такое положение связано с уменьшением покупательной способности населения в результате негативного действия на экономику России внешних факторов — ухудшения внешнеэкономической и внешнеполитической конъюнктуры. Продажа автомобилей по всем сегментам в 2016 г. по сравнению с 2012 г. сократилась более чем в 2 раза (табл. 5). Показатели производства и продажи автомобилей могли быть еще разительнее без государственной поддержки автомобильной промышленности по стимулированию спроса.

Итак, за период, прошедший со дня перехода автомобильной отрасли на рыночные условия хо-

Таблица 6

Экспорт автомобилей, тыс. шт., произведенных в России

Год	Легковые автомобили	Грузовые автомобили	Автобусы	Всего
1995	211,8	24,1	2,9	238,8
2008	132,5	44,5	10,1	187,1
2010	49,8	15,7	3,5	69,0
2012	113,0	20,8	4,3	138,1
2015	97,5	19,9	2,0	119,4
2016	68,0	14,3	1,9	84,1
Экспорт в % к выпуску				
1995	25,4	16,9	7,3	23,5
2012	5,6	9,8	7,3	6,1

зяйствования, выполнена одна из ключевых задач — качественный переход от страны — импортера подержанной автомобильной техники, к стране с развитым сборочным циклом современных автомобилей. Однако не решенными остались системные проблемы:

во-первых, из-за ограничения по указанным выше причинам внутреннего спроса на автомобили имеет место значительное недоиспользование производственных мощностей, что ухудшает финансовое положение предприятий;

во-вторых, несоблюдение зарубежными концернами соглашений с Минпромторгом России по локализации производства автокомпонентов, что сдерживает создание новых рабочих мест и уменьшает получение добавленной стоимости в России;

в-третьих, острый дефицит современных знаний и компетенций по выпуску новых продуктов на рынок сдерживает применение таких современных технологий, как модульное проектирование, уход от использования традиционных источников энергии, автономное вождение и др.

Для преодоления кризиса в автомобильной отрасли необходимо усовершенствовать механизм управления ею с использованием экономических, финансовых и организационно-правовых инструментов, из которых, на взгляд автора, особенно важным является продвижение автомобилей на зарубежные рынки. Анализ показал, что этому направлению в отрасли не уделяется пока должного внимания (табл. 6). Из приведенных данных видно, что экспорт автомобилей в новых условиях деятельности автопрома подвержен значительным колебаниям, но в целом имеет отрицательную динамику. В 2016 г. число легковых автомобилей, поставленных на зарубежные рынки, сократилось по сравнению с 1995 г. с 211,8 тыс. до 68 тыс. шт., или в 3,1 раза. Отрицательная динамика прослеживается и в доле экспорта к выпуску автомобилей: в 2012 г., когда был достигнут наибольший объем производства автомобилей, их экспорт к выпуску составил 5,6 %, что меньше достигнутого уровня по экспорту автомобилей в 1995 г. в 4,5 раза.

Отметим, что значительные поставки отечественных автомобилей на экспорт связаны с рынками дальнего зарубежья. Так, в 1995 г. доля экспорта в страны дальнего зарубежья (Азия, Ближний Восток, Южная Америка) составила 86 % в общем объеме поставок. Для существенного увеличения экспорта автомобильной продукции необходимо широкое сочетание бюджетных стимулов и инструментов регулирования, но в первую очередь необходимо повысить значение стратегического планирования в отрасли.

По поручению Правительства РФ и руководствуясь требованиями Федерального закона "О стратегическом планировании в Российской Федерации" от 28.06.2014 г. № 172-ФЗ, Министерство экономического развития РФ, Минпромторг России, Kinsey & Company и НАМИ разработали "Стратегию развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года". Стратегия введена в действие распоряжением Правительства РФ № 831-р от 28.04.2018 года.

В Стратегии дана оценка состояния технологии производства автомобилей, технического уровня выпускаемой продукции и определены основные цели и приоритеты развития автопрома до 2025 года, в том числе поставка произведенных автомобилей на экспорт и удовлетворение российскими производителями внутреннего спроса на современную автомобильную технику.

Поставка продукции на экспорт запланирована в Стратегии на уровне 12÷14 % произведенных автомобилей, что значительно ниже достигнутого автопромом ранее: 22,5 % в 1990 г.; 23,5 % в 1995 г. Кроме того, этот показатель не обеспечивает выполнение автопромом объема экспорта продукции в долларовом эквиваленте, указанному в ОНДП.

В Стратегии удовлетворение внутреннего спроса на современную автомобильную технику российскими производителями предусмотрено на уровне 80÷85 %. Это означает, что оставшуюся часть спроса предусматривается покрыть поставками по импорту.

Применение в России режима "промышленной сборки" зарубежных автомобилей позволило создать достаточные мощности для производства автомобилей до конца 2025 г. В настоящее время в связи со снижением покупательной способности населения созданные мощности используются менее чем на 50 %. В этих условиях планирование поставок автомобилей по импорту является экономически неоправданным. Потребность рынка в современных моделях автомобилей в 2025 году может быть удовлетворена за счет их производства российскими автопроизводителями.

Исследования и обобщение опыта государственных мер поддержки автомобильной промышленности можно широко использовать в других отраслях машиностроения.

ve1219.fm Page 79 Friday, November 15, 2019 2:45 PM

УДК 621.0

И. Н. ОМЕЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, д-р экон. наук, А. Г. ЛАЗАРЕНКО, канд. экон. наук
(МГТУ им. Н. Э. Баумана), e-mail: logistic@ibm.bmstu.ru

Принципы инженерного проектирования

Рассмотрены базовые принципы инженерного проектирования. Установлены закономерности, позволяющие формализовать общую морфологию проектирования и сформировать инструменты для информационной поддержки инженерной деятельности.

Ключевые слова: принципы проектирования, информационная поддержка, структурирование, морфология, классификация.

The basic principles of engineering design are considered. Regularities are established that allow to formalize the general morphology of design and to form tools for information support of engineering activities.

Keywords: design principles, information support, structuring, morphology, classification.

При выполнении инженерных проектов важным условием получения качественных результатов является соблюдение базовых *принципов* [1—3] инженерной *проектологии* — области инженерии, содержащей систематизированные знания о рациональном проектировании объектов техники и технологии. При этом принципы проектологии играют роль обобщенных аксиоматических мета-правил [4—6], не нуждающихся в обосновании и имеющих форму самоочевидных основополагающих утверждений, которым рекомендуется следовать при решении конкретных инженерных задач. Принципы инженерной проектологии аккумулируют в себе эмпирически установленные и получившие всеобщее признание закономерности эффективной проектной деятельности, поэтому их знание и применение создает благоприятные предпосылки для разработки рациональных проектных продуктов.

Вместе с тем отметим, что в практике инженерного проектирования разработчики, как правило, акцентируют внимание в первую очередь на решении конкретных технических задач [7—9], а вопросы "общей идеологии" проектирования решают после. Это в значительной степени обусловлено тем, что знания об общих принципах проектирования имеют неполный и недостаточно систематизированный характер, а потому требуют дополнительного изучения конкретной предметной области.

В данной работе анализируется возможность структурирования и формализации сведений о принципах инженерного проектирования, а также предпринята попытка их систематизации. Цель работы — изучение и упорядочивание данных о принципах, задающих общие подходы к выполнению инженерных проектов.

При исследовании обсуждаемой проблемы используется понятие "проект", которое в стандарте ИСО 10007—1995 формулируется так: "Проект — это уникальный процесс, состоящий из набора взаимосвязанных контролируемых работ с датами начала и окончания и предпринятый для создания продукта, отвечающего заданным конкретным требованиям, включая ограничения по времени, затратам и ресурсам". Связанное с этим процессом понятие "проектный продукт" определяется стандартом ИСО 8402—2002 как результат выполнения проекта, который передается заказчику в соответствии с проектным заданием.

В работе принято следующее априорное допущение. Поскольку принципы выполнения проектного процесса представляют собой понятийную абстракцию, которая формируется в профессиональной среде в результате долговременного накопления и осмысления опыта практической проектной деятельности для изучения обсуждаемой проблемы, то в работе применен метод умозрительного *когнитивного* исследования [10—12]. Поэтому содержательная часть работы носит характер *обобщений, констатирующих толкование* семантики принципов проектирования как понятийных категорий [13—15].

Ограничено также число принципов проектирования (ПП), рассмотренных в настоящей работе. Размер группы исследуемых принципов ограничивается выборкой в объеме девяти терминологических единиц. Данная размерность перечня ПП и их содержание выбраны эвристически с учетом общих представлений о значимости принципов для создания качественных проектных продуктов. В выборку включены принципы *агрегированности* (ПП 1), *альтернативности* (ПП 2), *итерационности* (ПП 3), *минимальной достаточности* (ПП 4), *наследственности* (ПП 5), *новизны* (ПП 6), *правовой защищенности* (ПП 7), *системности* (ПП 8) *и унифицированности* (ПП 9).

Семантика принципов проектологии, являющаяся носителем их содержания, проявляется в наименовании и может быть расширена следующими формулировками.

Принцип ПП 1. Проектный продукт должен иметь гибкую конфигурацию, обеспечиваемую присоединением к его базовой комплектации внешних элементов-агрегатов, добавляющих новые функ-

ции и расширяющих его параметрические возможности.

Принцип ПП 2. Проектные решения следует формировать при наличии нескольких альтернативных вариантов решения задачи, дающих разные результаты. Это позволит найти потенциально возможные результаты и выбрать из них наиболее предпочтительный.

Принцип ПП 3. При неприемлемом для продолжения проекта результате, полученном на текущем этапе проектирования, следует вернуться к одному из предшествующих этапов с многоальтернативным исходом и выбрать для этого этапа иную альтернативу для дальнейшего развития проекта по новому пути.

Принцип ПП 4. В проектный продукт закладывается инженерное решение, гарантирующее выполнение требований технического задания на продукт, но без избыточного превышения уровня качества продукта, приводящего к неоправданному повышению его себестоимости.

Принцип ПП 5. При разработке проектного продукта наряду с новыми авторскими решениями сохранять рациональные решения, присутствующие в известных продуктах-прототипах.

Принцип ПП 6. Предлагаемое автором проектное решение должно содержать элементы актуальной новизны в сравнении с известными проектами-аналогами.

Принцип ПП 7. Разработчик должен строго соблюдать требования всех относящихся к проекту нормативных документов, имеющих официальный правовой статус и директивно определяющих методы, средства и процедуры проектного процесса. Это необходимо для защиты автора от возможных субъективных претензий со стороны Заказчика и третьих лиц к проекту, предъявляемых по формальным признакам.

Принцип ПП 8. Проектный процесс должен базироваться на системном подходе, повышающем его эффективность и предполагающем широкое использование системных моделей, а также применение методов и средств системного анализа и синтеза.

Принцип ПП 9. В разрабатываемом проектном продукте следует обоснованно широко применять унифицированные и типовые компоненты, что снизит трудоемкость проектного процесса, а также себестоимость проектного продукта.

Принципы инженерного проектирования, являющиеся понятийной категорией, можно охарактеризовать некоторым набором свойств. Так, анализ рассматриваемой выборки принципов проектологии позволил выявить такие свойства, как *аспектная дуальность*, *семантическая конфигурированность* и *форма применимости*. Рассмотрим содержание этих свойств и архитектуру их связей и отношений.

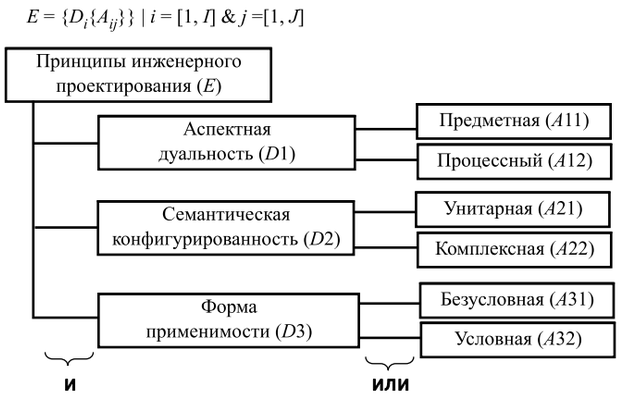
Дуальность принципов проявляется [16—18] в выборочной семантической двойственности каждого из них и принадлежности к одному из двух параллельно существующих аспектов проектной деятельности — процессному или предметному. Это свойство отображается в названии принципов и делит их множество на два семейства: *процессно* ориентированное (ПП 2, 3, 7, 8) и *предметно* ориентированное (ПП 1, 4, 5, 6, 9).

Свойство семантической конфигурированности принципов определяет число инструментов воздействия, которыми располагает принцип, на его проектную деятельность. По этому признаку принципы можно разделить на ПП с *унитарной* конфигурированностью, содержащие одну единственную семантическую компоненту, к которым относятся принципы ПП 2, 3, 8, и ПП *с комплексной* конфигурированностью, содержащие несколько взаимосвязанных семантических компонент, к которым относятся принципы ПП 1, 4, 5, 6, 7, 9.

Морфологическая модель выборочных принципов инженерного проектирования

Проектный принцип, индекс	Свойство принципа		
	Аспектная дуальность	Семантическая конфигурированность	Форма применимости
	Реализация свойства		
Агрегированности, ПП 1	Предметная	Комплексная	Условная
Альтернативности, ПП 2	Процессная	Унитарная	Условная
Итерационности, ПП 3	Процессная	Унитарная	Условная
Минимальной достаточности, ПП 4	Предметная	Комплексная	Безусловная
Наследственности, ПП 5	Предметная	Комплексная	Условная
Новизны, ПП 6	Предметная	Комплексная	Безусловная
Правовой защищенности, ПП 7	Процессная	Комплексная	Безусловная
Системности, ПП 8	Процессная	Унитарная	Безусловная
Унифицированности, ПП 9	Предметная	Комплексная	Условная

ve1219.fm Page 81 Friday, November 15, 2019 2:31 PM



Фасетный классификатор выборки ПП 1—9

Свойство *"форма применимости"* принципа определяет две альтернативные возможности участия ПП в проекте: *безусловная применимость* — это принципы ПП 4, 6, 7, 8, которые распространяются на все этапы и стадии инженерных проектов; *условная применимость* — это принципы ПП 1, 2, 3, 5, 9, которые включаются избирательно — только во фрагменты проектов, содержащих некоторые условия, играющие роль триггеров, запускающих их действия.

Анализ рассмотренных свойств [19], а также вариантов реализации проектных принципов в выборке ПП 1—9 при их декомпозиции, позволяет описать морфологическую структуру выборочных принципов инженерной проектологии на матричной модели (таблица).

Рассмотрение матричной модели позволяет констатировать следующее:

1) по признаку *совокупности свойств* для экземпляров выборки принципов ПП 1—9 является морфологически *однородной*. Каждому из принципов соответствует идентичная триада свойств — *аспектная дуальность, семантическая конфигурированность и форма применимости*;

2) одновременно для выборки ПП 1—9 характерна *индивидуальность* экземпляров ПП при реализации этих свойств (первая декомпозиция свойств).

Эти две характеристики морфологической модели позволяют системно описать сущность "принципы инженерного проектирования" на двухуровневой фасетной классификационной структуре [4], которая для выборки ПП 1—9 имеет вид древовидного неориентированного графа "И-ИЛИ" (рисунок). В корне графа лежит классифицируемая сущность E, связанная отношением "И" (конъюнкция) с множеством классификационных признаков (дискриминаторов) D_i сущности E, а каждый классификационный признак D_i связан отношением "ИЛИ" (дизъюнкция) с подмножеством атрибутов-категорий A_{ij}, которые являются возможными реализациями этого дискриминатора на уровне понятий.

При классифицировании сущности "принципы инженерного проектирования" на примере выборки ПП 1—9 символы элементов фасетного классификатора и их семантика принимают следующие конкретизированные значения: E — сущность "принципы инженерного проектирования", рассматриваемая как абстрагированное понятие; D_i — триада свойств сущности E; $i = [1, I = 3]$ — порядковый номер рассматриваемого свойства сущности E; A_{ij} — варианты альтернативных реализаций свойства D_i на первом уровне его декомпозиции; $j = [1, J = 2]$ — порядковый номер альтернативной реализации i-го свойства D_i классифицируемой сущности E.

Таким образом, фасетный классификатор выборочного множества ПП 1—9 можно использовать как инструмент для описания морфологии принципов инженерного проектирования и моделирования логической структуры этой понятийной категории (см. рисунок).

Выводы

1. В инженерной практике знание и применение базовых принципов проектирования являются важным инструментом для получения качественных результатов при разработке новых образцов техники и технологии.

2. В современном развитии инженерной проектологии раздел "принципы проектирования" разработан неполно и недостаточно систематизирован. Поэтому требуется дополнительное изучение данной понятийной категории.

3. Когнитивное исследование данных позволяет выделить группу часто применяемых принципов инженерного проектирования и предложить для них формулировку дескрипторов, а также семантических правил применимости.

4. Анализ рассмотренной в работе группы принципов показал, что они обобщаются идентичной структурой свойств, каждое из которых декомпозируется на набор альтернативных реализаций. Причем компоненты альтернативных подмножеств индивидуально распределяются между свойствами экземпляров множества принципов, образуя, таким образом, двухуровневую древовидную структуру, которая обобщается на фасетном классификационном графе.

5. Полученные результаты создают предпосылки для разработки формализованной системы знаний о возможностях и областях рационального применения базовых принципов инженерной проектологии, а также способствуют последующей разработке цифровых приложений для автоматизированной информационной поддержки практической инженерной проектной деятельности [20, 21].

ve1219.fm Page 82 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Ожегов С. И.** Словарь русского языка. М.: Советская Энциклопедия, 1973. 846 с.

2. **Большой** энциклопедический словарь: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Большая Российская энциклопедия; СПб.: Норинт, 2002. 1456 с.

3. **Фейнман Р.** Характер физических законов: Пер. с англ. Э. Л. Наппельбаума, В. П. Голышева. AST Publishers, 2015. 220 с.

4. **Евгенев Г. Б.** Системология инженерных знаний. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 376 с.

5. **Баглай М. В., Габричидзе Б. Н.** Конституционное право Российской Федерации: Учебник. М.: Издательская группа ИНФРАМ—КОДЕКС, 1996. 512 с.

6. **Peter R. Anstey.** The Idea of Principles in Early Modern Thought: Interdisciplinary Perspectives. New York: Routledge, 2017. 304 p.

7. **Мельников Г. Н., Вороненко П. И.** Проектирование механосборочных цехов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Под ред. А. М. Дальского. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

8. **Егоров М. Г.** Основы проектирования машиностроительных заводов. М.: Высшая школа, 1969, 480 с.

9. **Ямпольский Е. С.** Проектирование машиностроительных заводов и цехов: Справочник в 6 т. Т. 1. Организация и методика проектирования М.: Машиностроение, 1974. 296 с.

10. **Меркулов И. П.** Когнитивные способности / Институт философии РАН. Государственный университет гуманитарных наук. М.: Изд-во ИФ РАН, 2005. 182 с.

11. **Краткий** словарь когнитивных терминов / Е. С. Кубрякова, В. З. Демьянков, Ю. Г. Панкрац, Л. Г. Лузина. М.: Изд-во МГУ, 1996. 245 с.

12. **Гераськин А. С., Недогреева Н. Г.** Инновационные средства развития познавательной самостоятельности обучающихся. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2012. 116 с.

13. **Лахути Д. Г., Рубашкин В. Ш.** Семантический (концептуальный) словарь для информационных технологий // Научно-техническая информация. 2000. № 7. С. 1—9.

14. **Рубашкин В. Ш.** Представление и анализ смысла в интеллектуальных информационных системах. М.: Наука, 1989. 189 с.

15. **Лахути Д. Г., Рубашкин В. Ш.** Средства и процедура концептуальной интерпретации входных сообщений на естественном языке // Известия АН СССР. Серия Техническая кибернетика. 1987. № 2. С. 49—59.

16. **Дуальность** http://socionics.ru/relationships/488-dualnost.

17. **Шульман Г. А.** О некоторых принципах проведения исследований и изложения полученных результатов в соционике. Киев: СМиПЛ, 2001. № 1 (34).

18. **http://**ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Дуальные_отношения&oldid=93506329.

19. **Марка Д. А., МакГоуэн К.** Методология структурного анализа и проектирования. М.: Фирма "Мета Технология", 1993. 240 с.

20. **Евгенев Г. Б.** Интеллектуальные системы проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 335 с.

21. **Норенков И. П.** Основы автоматизированного проектирования: 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 336 с.

Вниманию авторов

Не допускается предлагать к публикации уже опубликованные или намеченные к публикации в других журналах материалы.

Статьи в редакцию можно присылать на e-mail: vestmash@mashin.ru. В случае пересылки статьи почтой, кроме текста, напечатанного на белой бумаге формата А4 на одной стороне листа через 1,5—2 интервала 14-м кеглем, необходимо прикладывать электронную версию (шрифт Times New Roman в Microsoft Word, 14-й кегль, расстояние между строк 1,5).

К статье прилагаются:

1) акт экспертной комиссии, подтверждающий, что статья не содержит материалов, входящих в перечень сведений, отнесенных к государственной тайне Указом Президента РФ № 1203 от 30.11.1995, и может быть опубликована в открытой печати;

2) аннотация (1—3 предложения) и ключевые слова;

3) сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, адрес, e-mail, телефон).

Объем статьи не должен превышать 20 страниц (с рисунками и таблицами). Все страницы должны быть пронумерованы. Рисунки и таблицы давать после текста.

Представляя статью в редакцию для публикации, авторы выражают согласие с тем, что:

1) статья может быть переведена и опубликована на английском языке;

2) после публикации в журнале материал может быть размещен в Интернете;

3) авторский гонорар за публикацию статьи не выплачивается.

Редакция оставляет за собой право сообщать автору о результатах рецензирования без предоставления рецензии.

Представленные в редакцию материалы обратно не высылаются.

Минимальный срок публикации — 4 месяца со дня предоставления рукописи в редакцию при соблюдении всех изложенных выше требований (обусловлен технологическим процессом).

ve1219.fm Page 83 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Указатель статей, опубликованных в журнале "Вестник машиностроения" за 2019 г.

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Албагачиев А. Ю., Раков Д. Л. — Морфологический подход к автоматизации создания технических систем на этапе технического предложения. № 3.

Александров И. К., Раков В. А. — Способ экспериментально-теоретического определения фрикционных характеристик пары трения для передачи вращательного движения с учетом скоростного и нагрузочного режимов. № 8.

Асадова Ю. С., Макаров В. А. — Динамические методы калибровки автоматических средств контроля герметичности. № 10.

Аскаров Е. С. — Разработка конструкции кулачково-винтового механического пресса усилием. № 8.

Афонин С. М. — Кодовое управление многослойным пьезоактюатором нано- и микроперемещений. № 12.

Баженов А. М., Щерба В. Е., Шалай В. В., Григорьев А. В., Кондюрин А. Ю. — Математическое моделирование рабочих процессов поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с щелевым уплотнением ступенчатого вида. № 2.

Бакланов А. В., Вахитов А. Р. — Влияние конструкции форсунки на основные характеристики отсека камеры сгорания газотурбинного двигателя. № 3.

Бардовский А. Д., Горбатюк С. М., Герасимова А. А. — Технические решения для совершенствования привода технологического оборудования. № 5.

Белов И. А., Маслов Л. Б. — Оценка поля динамических напряжений в протяженных конструкциях по ограниченным измерениям вибрации. № 7.

Благонравов А. А., Юркевич А. В. — Обеспечение максимально возможной энергоэффективности машин в городском транспортном потоке. № 11.

Блохин М. А. — Отстройка рабочих частот пильного модуля при плоском вращательно-поступательном движении полотен в составе многопильного блока. № 7. Мехатроника и робототехника в лесопильном оборудовании. № 8.

Болдырев Ю. Я., Алешин М. В., Давыдов И. С., Сундуков М. Ю. — Повышение аэродинамической эффективности малоразмерного центробежного компрессора. № 3.

Борисов И. И., Колюбин С. А. — Структурный и геометрический синтез механизма пальца универсального захватного устройства, осуществляющего точный щипковый и силовой обхватывающий захваты. № 11.

Бородина М. Б., Фошин А. Д., Булавин К. А. — Динамические нагрузки в приводе вращающейся печи для обжига извести. № 5.

Бохан В. В., Угренев М. В., Шварц А. А., Граков С. А., Зубарев А. В., Бобров С. П. — Концевая арматура для резинокордных конструкций из полимерных композиционных материалов. № 5.

Бурчак Г. П., Васильев А. П., Ляпушкин Н. Н., Савоськин А. Н. — Модель взаимодействия колеса и рельса с учетом дискретного строения металлов контактирующих тел. № 2.

Валуева М. И., Зеленина И. В., Мишуров К. С., Гуляев И. Н. — Обзор публикаций по разработкам лопаток из полимерных композиционных материалов для вентилятора авиационного двигателя. № 2.

Ванин В. А., Колодин А. Н. — Кинематическая структура металлорежущих станков со сложными движениями формообразования с внутренними гидравлическими связями на основе шагового гидропривода. № 4.

Верещака С. М., Жигилий Д. А., Данильцев В. В. — Определение прочности кольцевых образцов из стеклопластика на основе метода разрезного диска. № 12.

Воробьев Е. И., Зуев В. В., Филиппов Д. Г. — Кинематическая точность механизмов относительного манипулирования в технологических системах. № 10.

Воробьев Е. И., Михеев А. В., Моргуненко К. О. — Механизм ориентирующих движений антропоморфных роботов и протезов рук с линейными и вращательным приводами. № 11.

Воронин Н. А., Кравчук К. С. — Методика определения адгезионной прочности тонких твердых покрытий. № 10.

Галкин В. В., Дербенев А. А. — Влияние повреждаемости структуры при многоэтапной холодной деформации на механические свойства малоуглеродистых и борсодержащих сталей. № 1.

Гончаров Ю. А., Гончаров О. Ю., Баранова И. А. — Рациональное проектирование планетарных передач. № 7.

Гордеев Б. А., Любимов А. К., Охулков С. Н., Титов Д. Ю., Ермолаев А. И. — Влияние входного виброускорения широкополосной случайной вибрации на амплитудно-частотные характеристики гидроопор. № 6.

Гусев А. С., Буда-Красновский С. В., Стародубцева С. А. — Статистическое определение сопротивления усталости. № 1.

Добрецов Р. Ю., Поршнев Г. П., Войнаш С. А. — Устойчивость движения сочлененной гусеничной машины. № 3.

Дьяков И. Ф. — Численный метод расчета несущей системы транспортных средств. № 11.

Дьяков И. Ф., Моисеев Ю. В. — Основы подрессоривания транспортных средств. № 9.

Ерохин М. Н., Леонов О. А., Катаев Ю. В., Мельников О. М. — Методика расчета натяга для соединений резиновых армированных манжет с валами по критерию начала утечек. № 3.

Захаров М. Н., Куц М. С. — Расчет силы затяжки болтов из условия равноопасности раскрытия стыка и усталостного разрушения. № 10.

Захаров М. Н., Любченко М. А., Магнитский И. В. — Проектирование резьбового образца для высокотемпературных механических испытаний углерод-углеродных композиционных материалов. № 3.

Зеленский А. А., Стебулянин М. М., Абдуллин Т. Х., Харьков М. А. — Реализация ускоренных вычислений прямой задачи кинематики для промышленных роботов. № 11.

Зеленский А. А., Франц В. А., Семенищев Е. А. — Алгоритм планирования траектории рабочего органа ма-

ve1219.fm Page 84 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

нипулятора для привязки базисных систем координат с использованием технического зрения. № 10.

Зубков Е. В., Бурганова Н. Т., Ченчик В. В. — Нейронечеткое моделирование топливопотребления дизеля при динамических нагрузках. № 10.

Зуев А. С., Лепешкин А. В. — Изготовление узлов стыка корпуса РДТТ. № 8.

Иванов А. С. — Испытания машин на надежность при их разработке. № 10.

Иванов А. С., Куц М. С., Нагибина В. О., Попов М. А. — Исследование жесткости стяжных валов. № 2.

Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А., Аносов М. С., Колчин П. В., Кузьмишина А. М. — Кибер-физическая система станка с ЧПУ как основа цифрового двойника оборудования. № 5.

Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А., Колчин П. В., Мансуров Р. Ш. — Модульное проектирование станочного оборудования как киберфизических систем на основании исскуственного интеллекта и облачных технологий для цифровых производств. № 1.

Кавтарадзе Р. З., Натришвили Т. М., Глонти М. Г., Ичун Ван, Сахвадзе Г. Ж. — Моделирование локального теплообмена в камере сгорания водородного дизеля. № 7.

Карелин И. Н., Чернова Т. А. — Проектирование газонефтяной арматуры повышенной долговечности. № 9.

Клебанов Я. М., Мурашкин В. В., Петров Н. И., Данильченко А. И., Бруяка В. А., Поляков А. — Влияние условий эксплуатации на работоспособность роликоподшипников ГТД. № 11.

Козлов П. Н. — Критерий эквивалентности сложного напряженного состояния простому растяжению для конструкционных материалов. № 6.

Колесников В. И., Озябкин А. Л., Воропаев А. И., Вермель В. Д., Леонтьев А. Е. — Диагностика диссипативных характеристик демпферов. № 3.

Кондаков С. В., Вечтейн Н. А., Дубровский Н. В. — Алгоритм управления гибридной моторно-трансмиссионной установкой быстроходной гусеничной машины с механической трансмиссией. № 2.

Коростелев С. А. — Напряженно-деформированное состояние резиновых элементов внутренней амортизации опорного катка малого диаметра гусеничного движителя. № 7.

Короткин В. И. — Использование модифицированных упрочненных зубчатых передач Новикова в редукторах общемашиностроительного применения. № 11.

Красильников А. Я. — Определение силы сдвига тонких высококоэрцитивных постоянных магнитов КС-25ДЦ в магнитных системах и магнитных муфтах. № 1.

Красильников А. Я. — Определение силы сдвига тонких высококоэрцитивных постоянных магнитов Ч36Р в магнитных системах и магнитных муфтах. № 5.

Крыхтин Ю. И., Карлов В. И. — Выбор передаточного числа бортовой передачи трансмиссий легких гусеничных машин с учетом особенностей распределения передаточных чисел силовых узлов. № 5.

Крючков Д. И., Березин И. М., Петунин А. А. — Компьютерное моделирование штамповки длинномерной листовой заготовки элемента шарового резервуара. № 2.

Кулиев С. А., Мамедов А. Ф. — Определение напряжений в ступице соединения с натягом при нагружении. № 7.

Лагунова Е. О. — Разработка расчетной модели радиального подшипника с учетом зависимости вязкости смазочного материала от давления и температуры. № 3.

Лагута В. С. — Ранжирование эксплуатационных показателей испытательного стенда эластомерных материалов. № 7.

Лазарев С. И., Ковалев С. В., Ковалева О. А., Коновалов Д. Н. — Разработка конструкции и расчет эффективной площади мембран и общего объема разделяемого раствора в электробаромембранном аппарате рулонного типа. № 12.

Ларин С. Н., Платонов В. И. — Оценка изменения предельных геометрических характеристик заготовки в процессе пневмоформовки прямоугольных каналов в многослойных конструкциях. № 6.

Леонов О. А., Шкаруба Н. Ж., Вергазова Ю. Г. — Расчет допуска посадки с натягом по модели параметрического отказа. № 4.

Лустенков М. Е., Лустенкова Е. С. — Оценка кинематических возможностей и КПД сферической и роликовой передач. № 3.

Мамедов А. Т., Мехтиев Р. К. — Модель и механизм упрочнения металлов дисперсными частицами. № 5.

Мевша Н. В., Пунтус А. В. — Контроль геометрических параметров роликовых цепей. № 2.

Муницын А. И., Муницына М. А., Крайнова Л. Н. — Динамика цилиндра со смещенным центром тяжести на вибрирующем основании с учетом сухого трения. № 1.

Нижегородов А. И. — Энерготехнологический агрегат с вибрационной подовой платформой для термообработки минерального сырья. № 1.

Нижегородов А. И., Кокоуров Д. В. — Показатели эффективности электрической печи с вибрационной подовой платформой и технологический комплекс на ее основе. № 5.

Никифоров С. О., Мархадаев Б. Е., Челпанов И. Б. — Оценка и анализ кинематических и динамических погрешностей воспроизведения программных траекторий рабочего органа мехатронных манипуляторов по кинематическим параметрам. № 4.

Новожилов А. Н., Юсупова А. О., Новожилов Т. А. — Способ определения смещения вала ротора в электрической машине. № 7.

Носко А. Л., Сафронов Е. В. — Стенд для испытаний тормозных роликов гравитационных конвейеров и стеллажей для паллет. № 2.

Окунев А. П., Боровков А. И., Карев А. С., Лебедев Д. О., Кубышкин В. И., Никулина С. П., Киселев А. А. — Виртуальное моделирование тягово-динамических показателей сельскохозяйственной техники. № 3.

Опацких А. Н., Солоп С. А., Черняев С. С. — Гидродинамический расчет упорного подшипника с адаптированным профилем. № 5.

Орлов А. А. — Модель управления подачей при объемном фрезеровании на станках с ЧПУ. № 2.

Павлов В. Ф., Букатый А. С., Семенова О. Ю. — Прогнозирование предела выносливости поверхностно-упрочненных деталей с концентраторами напряжений. № 1.

Пантюхова К. Н., Путинцев В. Ю., Путинцева А. Р. — Исследование прочности волнистого соединения составной холодновысадочной матрицы. № 3.

ve1219.fm Page 85 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Покровский А. М., Дубин Д. А., Вдовин Д. С. — Математическая модель распространения усталостной трещины в торсионном вале системы подрессоривания быстроходной гусеничной машины. № 4.

Похабов Ю. П. — Анализ и оценка надежности высокоответственных технических систем единичного производства. № 10.

Привалова О. В., Свияженинов Е. Д., Фридман В. М. — Эффективный метод приближенного решения задачи о нелинейных периодических колебаниях механической системы. № 12.

Пылаев Б. В. — Профилирование пространственного кулачка высокомоментного вариатора. № 5.

Решенкин А. С. — Особенности магнитошумовой диагностики конструкций. № 1.

Рызванович А. Я., Генералов В. А. — Новые конструкции передач, реализующие крутильные колебания виброшпинделя. № 4.

Рыков А. А., Титоренко В. П. — Конструкции и расчет высокоскоростных электромагнитных приводов ударных стендов. № 2.

Рязанцев В. М. — Выбор профилей винтов двухвинтовых мультифазных насосов. № 8.

Савельев С. В., Шушубаева М. К. — Конструкция и расчет нового рабочего органа уплотняющей дорожной машины. № 10.

Савинкин В. В., Кузнецова В. Н. — Обоснование оптимальных углов позиционирования рабочего оборудования экскаватора при эффективном копании грунта. № 1.

Савинкин В. В., Кузнецова В. Н., Ратушная Т. Ю., Киселев Л. А. — Исследование усталостных напряжений в фазовой структуре материала пера лопатки и оценка ресурса турбины. № 6.

Сапсалев А. В., Богданов В. В., Дыбко М. А., Давыденко О. Б. — Структурное моделирование магнитной муфты. № 11.

Свобода Д. Г., Жарковский А. А., Иванов Е. А., Шуцкий С. Ю., Дягилев П. Ю. — Создание осевых насосов с высоким КПД и незападающей формой характеристики. № 4.

Слепцов В. В., Савилкин С. Б., Осипов В. В., Мацыкин С. В. — Частотный преобразователь для трехфазных асинхронных электродвигателей с питанием от низковольтного источника постоянного напряжения. № 9.

Слепцов В. В., Ушкар М. Н., Зинин Ю. В., Куликов С. Н. — Гибридный накопитель для возобновляемых источников энергии и бесперебойного питания электроприводов. № 8.

Соколов С. А., Грачев А. А., Васильев И. А. — Анализ прочности элемента конструкции с трещиной в условиях отрицательных климатических температур. № 11.

Соловьев Д. А., Журавлева Л. А. — Исследование влияния конструктивных параметров дождевателей на формирование дождя. № 12.

Станкевич И. В. — Численное решение задачи теории упругости с односторонними связями с использованием метода конечных элементов в смешанной формулировке. № 2.

Стебулянин М. М., Маляренко А. В. — Метод стабилизации скорости интервальных мехатронных систем. № 9.

Столбов М. С. — Термотропная двухзонная модель сгорания топлива в ДВС. № 8.

Сыркин В. В., Галуза Ю. Ф., Трейер В. А., Абрамова И. А. — Расчет предохранительного клапана прямого действия с эластичным запорно-регулирующим элементом. № 3.

Тарарыкин С. В., Копылова Л. Г. — Особенности возникновения и компенсации колебаний моментов нагрузки электродвигателей в электромеханических системах. № 11.

Труханов В. М., Лазарев В. В. — Планирование испытаний дорогостоящих объектов методом фиксированного объема. № 11.

Тюлин А. Е., Богинский А. И., Чурсин А. А. — Создание ключевых технологических компетенций и их влияние на эффективность передовых космических технологий. № 10.

Устарханов О. М., Батдалов М. М., Муселемов Х. М., Устарханов Т. О. — Экспериментальные исследования трехслойных труб. № 9.

Утенков В. М., Досько С. И., Молчанов А. А., Бренгауз А. Р. — Модальная диагностика конструкций токарных станков со станинами из композитных материалов. № 6.

Феофанов А. Н., Амачиев Л. А. — Организация базы данных для повышения эффективности обработки информации, получаемой из протокола системы автоматической оптической инспекции. № 8.

Фомин М. В., Фомина И. М. — Повышение эффективности работы молекулярных ступеней со спиральными каналами гибридного турбомолекулярного вакуумного насоса. № 6.

Фот П., Каменев С. В., Крылова С. Е., Тарова М. Ю., Гладковский С. В., Каменцев И. С. — Прогнозирование долговечности пластин звеньев приводных роликовых цепей. № 2.

Хабрат Н. И., Умеров Э. Д. — Разработка конструкции, теории и расчета основных параметров полиспаста с дифференциальным блоком. № 6.

Шишкин С. В. — Конструкция и расчет термомеханического съемника. № 9. Об экспериментальной оценке фреттингостойкости роликовых опор. № 12.

Щерба В. Е., Шалай В. В., Кондюрин А. Ю., Носов Е. Ю., Баженов А. М., Лысенко Е. А., Болштянский А. П. — Разработка и исследование экспериментального образца поршневой гибридной энергетической машины. № 8.

Щерба В. Е., Шалай В. В., Кондюрин А. Ю., Крюков К. С., Залознов И. П. — Теоретическое исследование процесса сжатия, основанного на массообменном и тепловом взаимодействиях, в насосе объемного действия. № 1.

Щерба В. Е., Шалай В. В., Труханова Д. А., Носов Е. Ю., Павлюченко Е. А., Залознов И. П. — Разработка и экспериментальное исследование поршневой гибридной энергетической машины с газовым объемом на всасывании. № 4.

Юсупов А. К., Муселемов Х. М., Устарханов Т. О., Джалалов Ш. Г. — Исследование металлодеревянной балки. № 12.

Юшин Е. С. — Комплексная методика оценки текущего технического состояния нефтегазопромыслового оборудования по развитию трещиноподобных дефектов при циклическом деформировании в агрессивных средах. № 6.

Яковлев С. Н., Мазурин В. Л. — Экспериментальное определение долговечности полиуретанового манжетного уплотнения. № 4.

Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки

Албагачиев А. Ю., Буяновский И. А., Самусенко В. Д., Чурсин А. А. — Температурная стойкость космических смазок российского производства. № 9.

Албагачиев А. Ю., Зернов Е. В. — Теоретический метод определения коэффициента трения при осадке тонкой жесткопластической пластины квадратного сечения. № 4.

Воронин Н. А. — Разработка и анализ диаграмм внедрения, используемых при создании топокомпозитов триботехнического назначения. № 1.

Иргашев А., Ишмуратов Х. К. — Накопление продуктов изнашивания при контакте выступов поверхностей зубчатых колес. № 8.

Кисель А. Г., Рогачев Е. А., Евдокимова О. П., Сергеев В. А., Балова Д. Г. — Влияние физико-химических свойств СОЖ на коэффициент трения при токарной обработке разных сплавов. № 6.

Князев Д. В., Ражиков В. Н. — Исследование и моделирование потока смазочного материала в зазорах между гильзой и ротором электродвигателя. № 1.

Кохановский В. А., Глазунов Д. В. — Концепция унификации трибосистем. № 10.

Лебедев Д. И., Винокуров Г. Г. — Автокорреляционные функции взаимодействия поверхностей трения износостойкого газотермического покрытия и стального контртела. № 10.

Рощин М. Н. — Фрикционные свойства покрытий, наплавленных лазером. № 6.

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Адаскин А. М., Григорьев С. Н. — Перспективы применения хромоникелевого сплава при изготовлении штампового инструмента для горячего деформирования труднообрабатываемых материалов. № 10.

Албагачиев А. Ю., Хасьянова Д. У. — Особенности формирования и высокотемпературной обработки пустотелых заготовок при изготовлении деталей из сплава с эффектом памяти формы. № 7.

Алехина В. К., Бикбаев Р. М., Глущенков В. А., Гречников Ф. В. — Использование материалов с памятью формы в технических устройствах. № 9.

Анциборов А. Н., Климов А. С., Климов В. С., Кудинов А. К. — Способы измерения активного и реактивного сопротивлений сварочного контура контактных машин. № 3.

Архипов В. Е., Лондарский А. Ф., Москвитин Г. В., Пугачев М. С. — Оценка когезионной прочности газодинамических покрытий. № 4.

Балуев Р. О., Нестеров Б. А., Ворожцов К. В. — Автоклавное формование теплозащитных покрытий на крупногабаритных изделиях с применением металлокомпозитной оправки. № 4.

Беляева И. А., Глущенков В. А. — Гибридные и комбинированные технологии статического и магнитно-импульсного нагружения в листоштамповочном производстве. № 12.

Братковский Е. В., Шаповалов А. Н., Дема Р. Р. — Повышение ударно-абразивной стойкости сталей. № 3.

Василенко В. Н., Фролова Л. Н., Михайлова Н. А., Драган И. В., Таркаева Д. А. — Ресурсосберегающее оборудование нового поколения для переработки масличного сырья. № 4.

Винокуров Г. Г., Стручков Н. Ф., Большаков А. М. — Формирование пористости в слоистой структуре износостойких модифицированных порошковых покрытий. № 6.

Волков С. С., Розанов Д. С., Королев С. А. — Обработка сварных соединений ультразвуковыми колебаниями. № 3.

Воронцов А. Л. — Получение пластической деформацией крупных дисков из цилиндрических заготовок. Часть 1. Постановка задачи. № 3. Часть 2. Исследование внедрения центрального пуансона на стадии образования вогнутости. № 4. Часть 3. Исследование окончательного этапа внедрения центрального пуансона. № 5. Часть 4. Исследование деформации выступа кольцевым пуансоном. № 6. Часть 5. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов. № 7.

Гафаров А. М., Шарифов З. З., Гафаров В. А. — Исследование остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей, обработанных асимметрично-безотрывочной притиркой. № 5. Исследование микротвердости поверхностей деталей, обработанных асимметрично-безотрывочной притиркой. № 6.

Горунов А. И., Каляшина А. В., Габитов А. А. — Математическое обоснование экспериментально подобранной технологии лазерного упрочнения с применением роботизированного комплекса. № 4.

Груздев А. А., Моргунов Ю. А., Саушкин Б. П., Хомякова Н. В. — Электроэрозионная прошивка отверстий малого диаметра в фильтрах с наложением ультразвука. № 12.

Гусейнов А. Г., Кязимова Х. А. — Диффузионная металлизация для повышения износостойкости деталей гусеничных движителей. № 1.

Долгов В. А., Луцюк С. В., Подкидышев А. А. — Информационная поддержка процессов освоения прогрессивных технологий на машиностроительных предприятиях. № 11.

Жарков В. А. — Испытания материалов. Двухугловая гибка с прижимом заготовки № 2. Гибка втулок из композитов. № 6. Гибка листов и профилей на четырехвалковой машине для корпусов ракет, трубных и каркасных изделий. Часть 1. № 8. Гибка листов и профилей на четырехвалковой машине для корпусов ракет, трубных и каркасных изделий. Часть 2. № 12.

Закиров И. М., Семешко М. А., Фелюнина Т. А. — Формообразующие операции при изготовлении складчатых изделий. № 1.

Зуев А. С., Лепешкин А. В. — Оптимизация процесса разрушения песчано-полимерных формообразующих оправок № 1. Изготовление узлов стыка корпуса ракетного двигателя твердого топлива. № 2.

Иванов А. М. — Разрушение низколегированной стали, подвергнутой пластической деформации, при низкой температуре. № 10.

Иванов-Польский К. В., Кувалдин Ю. П., Певзнер М. З. — Экономически обоснованная настройка размерной обработки изделий. № 8.

ve1219.fm Page 87 Friday, November 15, 2019 2:31 PM

Кабалдин Ю. Г., Колчин П. В., Шатагин Д. А., Аносов М. С., Чурсин А. А. — Цифровой двойник 3D-печати на станках с ЧПУ. № 7.

Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А., Кузьмишина А. М. — Использование цифровой модели режущего инструмента при его выборе. № 6.

Каблов В. Ф., Кейбал Н. А., Кочетков В. Г., Мотченко А. О. — Эластомерные огнетеплозащитные материалы, содержащие углеродные микроволокна. № 3.

Калашников А. С., Моргунов Ю. А., Васильев А. Н., Аббясов В. М. — Особенности технологии изготовления конических колес с круговыми зубьями в малоотходном производстве. № 12.

Климов А. С., Анциборов А. Н., Климов В. С., Кудинов А. К. — Управление током при контактной сварке. № 6.

Козлов А. А., Боровик И. Н., Ермашкевич А. А., Ташев В. П., Гусейнов Ш. Л., Косых В. А. — Исследование процесса самовоспламенения топлива, состоящего из высококонцентрированной перекиси водорода, керосина и пирофорных добавок. № 12.

Козлов Г. В., Долбин И. В. — Перспективы создания ультравысокомодульных полимерных нанокомпозитов для машиностроения. № 3.

Кондусов Д. В., Кондусова В. Б. — Интеллектуализация автоматизированного проектирования с использованием накопленных инженерных знаний. № 5.

Коробова Н. В., Бадалян А. Ж., Дмитриев А. М. — Сокращение расчетов и числа измерений при исследовании деформаций заготовок по искажениям координатных сеток. № 10.

Коростелкин А. А., Клявин О. И., Алешин М. В., Ван Суйфэн, Ван Годун, Лю Цзини — Оптимизация массы кузова в контексте краш-теста автомобиля класса внедорожник. № 9.

Костышев В. А., Ашурова А. Х. — Разработка технологических параметров при раскатке колец. № 5.

Кохановский В. А., Глазунов Д. В. — Фторпластсодержащие покрытия при возвратно-качательном движении. № 11.

Кочетков Ю. М., Кравчик Т. Н., Подымова О. А. — Пять теорем турбулентности и их практические приложения. № 7.

Крюков С. А., Шумячер В. М., Байдакова Н. В. — Определение параметров термообработки абразивных инструментов на керамической связке. № 8.

Кычкин А. К., Гаврильева А. А. — Оценка дисперсности порошков, модифицированных тугоплавкими добавками для газотермического напыления. № 8.

Ларин С. Н., Платонов В. И. — Исследование качества изделий из алюминиевых сплавов, получаемых изотермическим свободным деформированием в квадратную матрицу. № 1.

Лузенин А. Ю., Нестерова Т. А. — Отработка технологии защитного оксидирования деталей из титановых сплавов. № 5.

Малыгин В. И., Кремлева Л. В., Обловацкая Н. С. — Влияние параметров ультразвуковой финишной обработки на шероховатость обработанных поверхностей деталей судостроительного назначения. № 2.

Мамонов В. И., Полуэктов В. А. — Моделирование параметров загрузки технологических единиц рабочих центров. № 1.

Мин П. Г., Вадеев В. Е., Крамер В. В. — Технология полной переработки отходов деформируемых жаропрочных сплавов. № 5.

Минаков А. П., Лустенков М. Е., Ильюшина Е. В., Камчицкая И. Д., Афанасьев П. В., Зайцев Д. Л. — Исследование воздействия твердых тел в вихревом потоке сжатого воздуха на качество поверхности при упрочняющей финишной обработке деталей разной жесткости. № 4.

Морозова Л. В., Раевских А. Н. — Исследование методами микроскопии дефектов в металлических деталях, полученных селективным лазерным сплавлением. № 10.

Мустаев И. З., Иванов В. Ю., Кандаров И. В., Муфтахова Н. А., Мустаев Т. И. — Оценка эффективности производства литейной оснастки для деталей авиационных двигателей. № 4.

Надиров У. М., Расулов Н. М. — Особенности технологических размерных цепей при вихревом нарезании канавок на поверхностях вращения. № 8.

Пачурин Г. В., Кузьмин Н. А., Филиппов А. А., Нуждина Т. В., Гончарова Д. А. — Механические свойства сталей с газофазным никелевым покрытием. № 4.

Перминов А. Е., Игнатов М. Г., Прокофьев Е. Ю. — Экспресс-контроль глубины цементированного слоя детали. № 2.

Пристинский Ю. О., Перетягин Н. Ю., Кузнецова Е. В., Перетягин П. Ю. — Сравнение механических свойств твердых сплавов ВК6, полученных традиционным методом и искровым плазменным спеканием. № 9.

Романенко Е. Ф., Горожанкин В. В., Шестаков В. М., Терехин М. С. Романенко Д. Н., Дема Р. Р. — Опыт применения аддитивных технологий при восстановлении изношенной сферической поверхности конуса дробилок КСД и КМД для продления ресурса. № 5.

Сахвадзе Г. Ж., Кавтарадзе Р. З., Натриашвили Т. М., Сахвадзе Г. Г. — Усталостная долговечность материалов, упрочненных лазерно-ударно-волновой обработкой. № 10.

Сергеев С. В., Сергеев Ю. С. — Имитационное моделирование процесса виброперемешивания при приготовлении и восстановлении технологических жидкостей. № 4.

Сирицын А. И., Башкиров В. Н., Широких Э. В. — Обеспечение виброустойчивости горизонтальной шлифовальной головки карусельно-шлифовальных станков с ЧПУ. № 1.

Слепцов В. В., Савкин А. В., Трунова Е. А., Кукушкин Д. Ю., Дителева А. О. — Особенности электроискрового диспергирования материалов для получения нанопорошков токопроводящих металлов. № 11.

Суслов А. Г., Федонин О. Н., Медведев Д. М. — Проектирование функционально ориентированных технологических процессов. № 9.

Табаков В. П., Чихранов А. В., Долженко Я. А. — Исследование параметров структуры и механических свойств износостойких покрытий на основе нитрида ниобия. № 5.

Ходжибергенов Д. Т., Шеров К. Т., Есиркепов А. — Способ бурения и конструкция комбинированного бура сверло-фреза. № 5.

Холопов В. А., Антонов С. В., Курнасов Е. В., Каширская Е. Н. — Разработка и применение цифрового

двойника машиностроительного технологического процесса. № 9.

Цветков Ю. Н., Горбаченко Е. О., Голицын В. А. — Прогнозирование кавитационной износостойкости хромовых электролитических покрытий по профилю изношенной поверхности. № 4.

Чижиков В. И., Курнасов Е. В. — Тактильная идентификация поверхности предмета с использованием метода нечеткого управления. № 3.

Чумакова Л. А. — Влияние моментов прокатки на динамические нагрузки в приводе клети редукционного стана. № 7.

Шабурова Н. А. — Особенности разрушения стальных мелющих шаров. № 2.

Шарин П. П., Акимова М. П., Яковлева С. П., Большаков А. М., Попов В. И. — Структура и прочность переходной зоны при твердофазном термически активируемом контактном взаимодействии алмаза с железом и титаном. № 9.

Шморгун В. Г., Слаутин О. В., Артемьев А. А., Зорин И. В., Серов А. Г. — Исследование износостойкости слоистых интерметаллидных композитов системы Ti—Fe. № 11.

Проблемы теории и практики резания материалов

Анцев А. В., Пасько Н. И. — Учет разброса периода стойкости при оптимизации режимов резания и профилактической замены инструмента. № 9.

Гречишников В. А. — Повышение точности формирования режущей кромки резца при нарезании наружных резьб глубокого профиля. № 10.

Еренков О. Ю. Яворская Е. В., Яворский Д. О., Каленский А. М. — Предварительная обработка поверхностно-активными веществами заготовок из полимерных композиционных материалов для повышения качества точения. № 12.

Еренков О. Ю., Ивахненко А. Г., Куц В. В. — Выбор режимов резания для точения заготовок из фторопласта. № 11.

Забельян Д. М., Пухальский В. А., Зубов А. А. — Влияние скорости резания на крутящий момент при сверлении. № 8.

Зюзин А. А., Константинова И. С., Казьмин Б. Н., Юров М. Д. — Определение стойкости резцовых головок при зубонарезании конических колес с круговыми зубьями. № 2.

Каширская Е. Н. — Влияние знакопеременных напряжений на стойкость металлорежущего инструмента. № 7.

Ким В. А., Якубов Ч. Ф., Самар Е. В. — Диссипативные процессы контактного взаимодействия и стружкообразования при резании металлов. № 7.

Кудряшов Е. А., Смирнов И. М., Гришин Д. В — Обоснование выбора рациональной формы сменной многогранной пластины токарного резца. № 9.

Сизов С. В., Табаков В. П. — Моделирование воздействия импульсной лазерной обработки на композицию "твердосплавная основа — износостойкое покрытие". № 6.

Ходжибергенов Д. Т., Ибрагимова З. А., Ходжибергенова У. Д., Абдукаримов А., Шеров К. Т., Есиркепов А. — Основные аспекты программного обеспечения в проектировании и испытании режущих инструментов. № 6.

Обработка материалов без снятия стружки

Баранов Г. Л. — Влияние неравномерности распределения деформации на контактные напряжения при осадке прямоугольной полосы. № 11.

Грязев М. В., Ларин С. Н. — Разработка математической модели процесса вытяжки упрочняющегося материала с прижимом радиальной матрицей. № 1.

Кравченко Г. Н., Кравченко К. Г. — Обоснование эффективности восстановления усталостной долговечности поверхностно-упрочненных авиационных деталей повторным упрочнением дробью. № 12.

ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ

Андреева О. Н., Курнасов Е. В. — Нечеткая когнитивная модель для идентификации и анализа дестабилизирующих факторов и техногенных ситуаций. № 2.

Васильев Ю. С., Лиханов В. А., Лопатин О. П. — Улучшение экологических показателей мобильных теплоэнергетических установок при работе на альтернативных топливах. № 9.

Горынин В. И., Рогожкин В. В., Кондратьев С. Ю., Мишин Е. Б., Коленов Е. В. — Технология и средства конденсации атмосферной влаги морей для производства пресной воды. № 7.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Арсеньева Н. В., Путятина Л. М. — Классификация НИОКР в машиностроении для оценки рисков. № 8.

Богинский А. И., Чурсин А. А. — Конструкторские решения для оптимизации себестоимости. № 8.

Глущенко В. В., Глущенко И. И. — Формирование стратегии инновационного лидерства машиностроительной корпорации. № 7.

Долгов В. А., Кабанов А. А., Леонов А. А., Луцюк С. В. — Имитационное моделирование процессов технического обслуживания и ремонта оборудования. № 9.

Калмыков Ю. П. — Развитие машиностроения для пищевой и перерабатывающей промышленности. № 11. Проблемы и перспективы развития автомобильной промышленности в России. № 12.

Моргунов Ю. А., Саушкин Б. П. — Состояние и развитие машиностроительного производства России. № 5.

Октябрьский А. М., Абдикеев Н. М., Богачев Ю. С., Трифонов П. В., Ерошкин С. Ю. — Анализ проблем институционального обеспечения промышленного обеспечения России. № 7.

Омельченко И. Н., Лазаренко А. Г. — Принципы инженерного проектирования. № 12.

Червяков Л. М., Олейник А. В., Бычкова Н. А. — Производственные системы. Уровень "интеллекта". № 11.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Ордабаев Е. К., Ахметов С. И. — Концепция автомобиля с периодической изоляцией двигателя от окружающей среды. № 11.