ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ, НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

3 (57)
Март
2007

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Гл. редактор
В. А. Казаков

Зам. гл. редактора
Н. В. Посметная

В. Н. Алфеев
Н. П. Бирюкова
В. Д. Горбач
С. Н. Григорьев
Б. В. Гусев
А. В. Дуб
В. М. Ермаков
А. С. Зубченко
Е. А. Калашников
В. В. Капустин
А. Л. Карунин
И. П. Ксеневич
А. Е. Лигачев
А. А. Лозован
В. П. Лялякин
Е. А. Мачнев
Н. А. Паничев
В. Н. Семенов
О. С. Сироткин
Н. В. Смирнов
А. В. Телушкин
А. Н. Феофанов
К. В. Фролов
В. А. Фролов
В. К. Шелег
И. Н. Шиганов

Редакция:
С. В. Богус,
Л. Т. Мартыненко,
Т. П. Маслик

Компьютерная верстка:
И. С. Павлова

Дизайн обложки:
Е. С. Благовидов

Специальные корреспонденты:
А. Н. Иванов, А. В. Казаков,
Ан. А. Суслов

Редактор-переводчик
Е. О. Егорова

Корректор
Е. Г. Волкова

УЧРЕДИТЕЛЬ:
Издательский центр
"Технология машиностроения"
Журнал издается при содействии
Министерства промышленности
и энергетики РФ,
Министерства образования и науки РФ,
Российской инженерной академии,
Российского научно-технического
общества машиностроителей,
ОАО «ЦНИИТМАШ»

Адрес для корреспонденции:
129626, Москва, а/я 01

Контактный тел.: (495) 796 2491

E-mail: tm@folium.ru
(с пометкой для журнала
"Технология машиностроения")
Http://www.tm.folium.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-7779

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

Перепечатка материалов из журнала “Технология машиностроения” возможна при обязательном согласовании с редакцией журнала

При перепечатке материалов ссылка на журнал “Технология машиностроения” обязательна

© Издательский центр “Технология машиностроения”, "Технология машиностроения", 2007

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Михайлин Ю. А. — Полимерные композиционные материалы (армированные пластики, ВПКМ) 5

ЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Головкин П. А. — Повышение качества осесимметричных штампованных поковок из сплава АМг6 для герметичных сварных конструкций ответственного назначения 19

ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Рогов В. А., Рохин О. В. — Автоматизированное управление режимами резания при фрезеровании поверхностей крупногабаритных фасонных заготовок гребных винтов 25

Старков В. К., Рябцев С. А., Костров С. В. — Опыт шлифования зубчатых колес высокопористыми абразивными кругами 28

СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Багайсков Ю. С., Шумячер В. М. — Улучшение структурно-механических и эксплуатационных свойств абразивных инструментов с порообразователем 34

МЕХАНОСБОРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Санинский В. А., Быков Ю. М., Сторчак Н. А. — Методы стабилизации предельных зазоров коренных подшипников дизелей 38

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Панин В. Н. — Особенности сварки гидротехнических конструкций и оборудования. 43

ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Матвеев Н. В. — Получение несплошных износостойких покрытий в вакууме с применением формирующего сепаратора 55

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЙ

Чебурахин И. Ф., Дубограй И. В., Кобзев С. В., Недобой В. С. — Высокие технологии при проектировании интегральных схем 59

Иванайский А. В., Иванайский В. А. — Экспериментальное определение параметров возникновения низкочастотной вибрационной кавитации в воде 64

МЕТРОЛОГИЯ

Шевелев Ю. В. — Перспективы обеспечения испытательных лабораторий метрологическим оборудованием 67

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ИСПЫТАНИЯ

Дубов А. А., Колокольников С. М. — Оценка качества сварных соединений методом магнитной памяти металла в сравнении с радиационным и ультразвуковым методами 71

АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Мошкин И. В., Соловов А. В. — Оптимизация и критерии задачи “Space” САПР "ОРАТ" 76

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА

Контроль состояния и диагностика машин. Требования к обучению и сертификации персонала. Ч. 1. Требования к органам по сертификации и процедурам сертификации (ГОСТ Р ИСО 18436-1—2005). 80

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Курбатов С. М., Гаспаришвили И. А. — Социальная и экологическая отчетность как инструмент повышения эффективности системы управления компанией 85

Недобой В. С. — Современные технологии в управлении предприятием 87

ОБРАЗОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Петров А. П., Галкин В. И., Соколов В. С. — Практика непрерывной информационно-компьютерной подготовки студентов-технологов 90

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Потапова Г. С. — Содержание зарубежных журналов 92

ИНФОРМАЦИЯ

Добринский Е. С., Сеин В. А. — Технологическое обеспечение национального автомобилестроения 95

Иванов А. Н. — 3-я Международная выставка "Российская неделя контрольно-измерительного оборудования” 98

TEKHNOLOGIYA MASHINOSTROENIYA

REVIEW-ANALYTICAL, SCIENTIFIC-TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

3 (57) March 2007

EDITORIAL BOARD:

V. A. Kazakov
Editor-in-Chief

N. V. Posmetnaya
Deputy Editor-in-Chief

V. N. Alfeev
N. P. Biryukova
V. D. Gorbach
S. N. Grigoryev
B. V. Gusev
A. V. Dub
V. M. Ermakov
A. S. Zubchenko
E. A. Kalashnikov
V. V. Kapustin
A. L. Karunin
I. P. Ksenevich
A. E. Ligachev
A. A. Lozovan
V. P. Lyalyakin
E. A. Machnev
N. A. Panichev
V. N. Semenov
O. S. Sirotkin
N. V. Smirnov
A. V. Telushkin
A. N. Feofanov
K. V. Frolov
V. A. Frolov
V. K. Sheleg
I. N. Shiganov

Editorial staff:
S. V. Bogus,
L. T. Martynenko, T. P. Maslik

Computerized making-up:
I. S. Pavlova

Cover design:
E. S. Blagovidov

Special correspondents:
A. N. Ivanov, A. V. Kazakov,
An. A. Suslov

Editor-translator
E. O. Egorova

Proof-reader
E. G. Volkova

FOUNDER:
Publishing Centre
"Tekhnologiya Mashinostroeniya"
Journal is published in collaboration
with RF Ministry of Industry and Energetics,
RF Ministry of Education and Science,
Russian Engineering Academy,
Russian Scientific-Technical Society
of Machine Builders,
TSNIITMASH, JSC

Address: P.O.B.01, Moscow,
129626, Russia

Tel.: (495) 796 2491

E-mail: tm@folium.ru
(marked for journal
"Tekhnologiya Mashinostroeniya")
Http://www.tm.folium.ru

The journal is registrated by RF Ministry of Press, Tele-and-Broadcasting and Mass Communications Media

Registration certificate ПИ № 77-7779

Journal is included into the list of editions certified by RF Supreme Attestation Committee for publication of competitors works for scientific degrees

Reprinting of materials from "Tekhnologiya Mashinostroeniya" journal is possible in case of obligatory permission of editorial staff

Reference to "Tekhnologiya Mashinostroeniya" at reprint is obligatory

© Издательский центр "Технология машиностроения", "Технология машиностроения", 2007

CONTENTS

STRUCTURAL MATERIALS

Mikhaylin Yu. A. — Polymeric composite materials (reinforced plastics, VPCM) 5

BLANK PRODUCTION

Golovkin P. A. — Upgrading of AMr6-alloy axisymmetric closed die forgings for leakproof welded strength constructions. 19

FORMING TECHNOLOGIES

Rogov V. A., Rokhin O. V. — Cutting parameters automatic control system at large-dimension shaped blanks surtaces milling for screw propellers 25

Starkov V. K., Ryabtsev S. A., Kostrov S. V. — Gear grinding practice by high-porous abrasive discs 28

TOOLING PRODUCTION

Bagayskov Yu. S., Shumyacher V. M. — Improvement of constructive-mechanical properties and operating abilities of the porophore abrasive tool 34

MACHINING-AND-ASSEMBLY PRODUCTION

Saninsky V. A., Bykov Yu. M., Storchak N. A. — Diesel main bearing tolerance clearance regulation methods . . . 38

PERMANENT JOINTS PRODUCTION TECHNOLOGY

Panin V. N. — Hydroengineering constructions and equipment welding features 43

MODIFEING PROCESSES OF MACHINE PARTS SURFACES

Matveyev N. V. — Vacuum production of non-continuous antiwear coating using shaping separator 55

SPECIAL TECHNOLOGIES

Cheburakhin I. F., Dubogray I. V., Kobzev S. V., Nedoboy V. S. — Micro-circuitry design high technology 59

Ivanaysky A. V., Ivanaysky V. A. — Experimental characterization of low-frequency vibrating cavitation origin in water 64

METROLOGY

Sheveliov Yu. V. — Test laboratories supply prospects by metrological equipment. 67

TECHNICAL DIAGNOSTICS, NON-DESTRUCTIVE CHECK-AND-TESTING METHODS

Dubov A. A., Kolokolnikov S. M. — Welded joints quality assessment by the method of metal magnetic memory as compared to radiation and ultrasonic methods 71

PROCESSES AUTOMATION AND COMPUTERIZATION

Moshkin I. V., Solovov A. V. — Optimisation and criteria of the "OPAT" Space CAD task 76

STANDARDIZATION, CERTIFICATION, QUALITY SYSTEMS

State control and machine diagnostics. Personnel training and certification requirements. Part 1. Demands of the certification bodies and certification (GOST R ISO 18436-1—2005) 80

ECONOMICS AND PRODUCTION ORGANIZATION

Kurbatov S. M., Gasparishvili I. A. — Social and ecological accountancy as a company management system effectiveness increase tool 85

Nedoboy V. S. — On-line operation of business state-of-the-art technology 87

EDUCATION AND PERSONNEL TRAINING

Petrov A. P., Galkin V. I., Sokolov V. S. — Students' uninterrupted information-computing training practice as production engineer 90

FOREIGN EXPIRIENCE

Potapova G. S. — Foreign journals contents 92

INFORMATION

Dobrinsky Ye. S., Sein V. A. — Technological supply of the national motor-car construction 95

Ivanov A. N. — The 3rd International exhibition "Russian week of measuring equipment'2006" 98

Ю. А. МИХАЙЛИН, канд. техн. наук
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Полимерные композиционные материалы (армированные пластики, ВПКМ)

Введение

Требования к конструкционным и специальным материалам, наиболее полно отвечающим потребностям современной техники (прежде всего авиакосмической), стимулировали разработку и широкое использование композиционных материалов (КМ), особенно полимерных композиционных материалов (ПКМ), в которых наполнителями служат высокопрочные, высокомодульные непрерывные волокна и текстильные формы из них в виде нитей, жгутов, ровингов, лент (ПКМ с непрерывными волокнами, ВПКМ, армированные пластики, Composite Materials).

Наполнение полимеров дисперсными частицами (порошками, короткими волокнами), хотя и позволяет получать ПКМ с более высоким уровнем свойств (особенно при использовании волокон длиной l в 10—100 раз большей критической длины волокна $l_{крит}$, когда реализуется механизм перераспределения напряжений с матрицы на упрочняющие волокна) и со специальными свойствами (токопроводящие, магнитодиэлектрические, электроактивные и др.), но не дает возможности реализовать главное преимущество композиций с непрерывными волокнами (Composite Materials, ВПКМ, армированных КМ) — возможность конструирования структуры материалов с планируемой анизотропией свойств. Оптимальное армирование ВПКМ выделяет их в самостоятельную группу наполненных полимерных материалов (при наполнении порошками и короткими волокнами эффект анизотропии отсутствует, такие гетерофазные материалы сохраняют изотропность). В отечественной практике термин "армированные пластики" применительно к материалам, наполненным порошками и короткими волокнами, используют неправомерно (их относят к композиционным не с точки зрения механики и физики гетерофазных систем, а исходя из конъюнктурных соображений, с применением привлекающей потребителя терминологии). Иногда композиционными называют материалы, которые к КМ не имеют отношения (смеси термодинамически совместимых полимеров, полимеры, модифицированные с помощью добавок низкомолекулярных веществ и др.).

В зарубежной науке и технике к КМ чаще всего относят материалы, в которых в качестве наполнителей использованы непрерывные высокомодульные волокна (борные, углеродные, SiC, СВМПЭ, Kevlar), текстильные формы из них (нити, жгуты, ленты), позволяющие конструировать структуры ([0, ±45], [0, ±45, 90, 0] и др.), обеспечивающие оптимальные свойства при различных видах нагружения.

ВПКМ — гетерофазные композиции, структура которых при использовании современного расчетного аппарата может быть оптимизирована по отношению к характеру внешних воздействий и сконструирована с требуемым уровнем анизотропии свойств. ВПКМ — материалы многофункционального назначения, которые в зависимости от свойств компонентов могут сочетать конструкционные свойства с радиопрозрачностью, химической и радиационной стойкостью, экранирующей ионизирующее воздействие способностью, радиоэкранированием и радиопоглощением, применяемым для уменьшения радиолокационной заметности, УРЗ, в технологии Stealth.

ПКМ с непрерывными волокнами (ВПКМ)

Комплекс свойств ПКМ определяется свойствами компонентов (матрицы, наполнителя), их микро- и макроструктурой, границей раздела фаз, реакцией этих структур на внешние воздействия. ПКМ — гетерофазные материалы, в которых непрерывная матрица, взаимодействующая с наполнителем (межфазный слой — "сердце" ПКМ, площадь контакта матрица — наполнитель в объеме ПКМ в 1 мм^3, со степенью наполнения 50 % составляет 450—600 мм^2), воспринимает внешние нагрузки и перераспределяет их на наполнитель.

Наиболее высоки конструкционные свойства у ВПКМ с непрерывными волокнами (ВПКМ, однонаправленные, с планируемой анизотропией свойств).

Сочетая в одном материале компоненты разной природы, формы, размеров, регулируя их содержание, можно получать неограниченное число ПКМ и в очень широких пределах изменять их свойства.

Использование легких элементов (углерода в органических полимерах, углеродных материалах) наиболее перспективно для производства материалов с высокими механическими свойствами. Теоретическая прочность материала зависит от радиуса атома, образующего химическую связь.

Теоретическая прочность может быть рассчитана по уравнению ЛУМР (Гриффитса):

$$\sigma_{теор} \cong (2\gamma_F E/\pi a_0)^{0,5} = y(G_{I_c} E/a_0)^{0,5},$$

где γ_F — удельная поверхностная энергия (удельная энергия роста трещин, для полимеров равна

10^2—10^3 Дж/м^2); E — модуль Юнга, МПа; a_0 — расстояние между элементами (межатомное расстояние), образующими структуру (постоянная кристаллической решетки ~10^{-8} м, длина химической связи, дефекта, трещины); y — геометрические параметры образца; $G_{I_c} \cong 2\gamma_F$ — энергетический параметр трещинодвижущих сил, скорость (интенсивность) высвобождения упругой энергии при увеличении дефекта, Дж/м^2; I_c — индекс для условий роста трещины с ее раскрытием при растяжении.

Так как $\sigma_{теор} \cong 1/a_0^{0,5}$, а $a_0 \cong f(R_{атома})$, то при радиусе атома углерода R_c = 0,071 нм, теоретической прочности связи С—С, равной 16—25 ГПа, прочности π-связей С—С в карбо- и гетероциклах 210—250 кДж/моль (прочность первичных связей (кДж/моль): металлических — 110—350, ионных — 590—1050, ковалентных — 160—940, донорно-акцепторных — до 1000), $\sigma^+_{теор}$ для полимеров составляет 26,5—39,2 ГПа, $E^+_{теор}$ = 40÷350 ГПа.

Предел прочности объемных образцов (разрушающие напряжения при растяжении) $\sigma^+_{практ}$ составляет 60—120 МПа (отвержденные эпоксидные реактопласты), 115—195 МПа (жидкокристаллические ароматические полиэфиры Xydar, Vectra), 80—90 МПа (полисульфоны ПСН, Udel 1700), полиарилсульфоны Radel, полиэфирсульфон Victrex 200P), 100 МПа (ПЭЭК), 80—100 МПа (полифениленсульфиды Ryton, Forton — 140—180 МПа), 70—80 МПа (полифенилеоксиды Арилокс, Noryl), 105—185 МПа (термопластичные полиэфиримиды Ultem, полиимид LARC-TPI, полиамидимид Torlon), т. е. 2,5—3,8 % от $\sigma^+_{теор}$ ($E^+_{практ} \cong 5\ \% E^+_{теор}$), что связано с высокой дефектностью промышленных полимеров, обусловленной структурными и технологическими причинами.

По ЛУМР $\sigma^+_{теор}/\sigma^+_{практ} \cong (a_0/l)^{0,5}$, где l — длина дефекта, трещины, т. е. достаточно трещины длиной 1 мкм, чтобы $\sigma^+_{практ}$ снизилась в 10 раз.

Механические свойства волокон, особенно полимерных и углеродных, при формовании которых (наряду с масштабным фактором) реализуется микрофибриллярная высокоориентированная структура, существенно ближе к теоретическим (табл. 1); $\sigma^+_{практ}$ высокопрочных углеродных волокон составляет 5—7 ГПа, т. е. 7—10 % от $\sigma^+_{теор}$, равной 70 ГПа. $E^+_{практ}$ высокомодульных углеродных волокон равна 200—980 ГПа (20—90 % от $E^+_{теор}$); $\sigma^+_{практ}$ высокомодульных углеродных волокон из-за разориентирования микрокристаллов графита с низкой сдвиговой прочностью относительно оси волокна не превышает 3 % $\sigma^+_{теор}$ (2,5 ГПа).

Значения $E^+_{практ}$ полимерных волокон из ароматических полиамидов, СВМПЭ достигают 50 % $E^+_{теор}$, $\sigma^+_{практ}$ = 10÷15 % $\sigma^+_{теор}$.

Разработан большой ассортимент волокон (см. табл. 1) и текстильных форм, которые используются в производстве ПКМ, металлических (МКМ), керамических (ККМ), углеродных (УКМ) материалов и изделий из них.

В ПКМ в качестве матрицы используют различные полимеры (связующие), при этом упрочняющий компонент (наполнитель) может иметь любую природу. Свойства КМ образуются объемным сочетанием компонентов [1].

Непрерывная матрица воспринимает внешние нагрузки, передает их компонентам второй фазы (в ВПКМ — волокнам), останавливает рост трещин, появляющихся при разрушении волокон за счет относительно высокой пластичности или местного отслоения волокна от матрицы. Оба эти процесса приводят к поглощению (диссипации) энергии, выделяемой при разрушении волокон и характеризуются при растяжении параметром G_{I_c} (коэффициент интенсивности высвобождения упругой энергии деформации). Достаточный уровень трещиностойкости при обычных условиях нагружения обеспечивается при значениях G_{I_c} = 250÷350 Дж/м^2. Для сильнонагруженных конструкций требуется $G_{I_c} \geqslant$ $\geqslant$ 1000 Дж/м^2. Эластификация полимерных матриц без снижения их прочности и модуля упругости достигается при использовании "жидких" каучуков (и термопластов с высокими значениями G_c), приводящих к формированию гетерофазных дисперсий, в которых эластичная фаза с определенными размерами частиц распределена в объеме стеклообразной фазы, физически и химически взаимодействует с ней. При такой модификации G_{I_c} термореактивных матриц может быть повышена до 400—600 (1000) Дж/м^2. Трещиностойкость ПКМ симбатно коррелирует с трещиностойкостью матриц.

Матрица защищает наполнитель от воздействия окружающей среды (при водопоглощении 5—8 % прочность и модуль упругости снижаются на 15—20 %, теплостойкость — на 50—100 °С), опре-

Таблица 1

Волокно	ρ, г/см^3	σ^+, ГПа	E^+, ГПа	ε^+, %	σ^+/ρ, км	$E^+/\rho 10^3$, км	Диаметр филамента, мкм	Температура длительной работы на воздухе, °С	$T_{пл}$, °С
Стекло Е	2,5—2,6	1,7—3,5	64—73	3	118—138	27,6—30	5—25	350	1300
Стекло S	2,48—2,51	4—4,8	78—85	5,3	160—194	24,3—30	5—15	300	1650
Углеродное HM/UHM	1,96/⩾2,0	1,86—2,5/ 2,5—4,0	До 500/до 900	0,38—0,5	95—120	164—200	5—12	600	3650*
Углеродное HT10K	1,8	5 (до 7)	До 300	1,8—2,1	300—1100	160—200	5—7	500	3650*
Кварц	2,2—2,3	5,9	75	1,5—1,8	230—270	29—32	1—3	1300	1930
Базальт (49—55 % SiO_2)	1,7	1,97—2,5 (до 2,85)	71—90 (до 120)	—	—	—	8—14	700	1250
Асбест (хризотил)	2,4—2,6	1,38—2,1 (до 4,2)	160—172 (до 220)	—	55	69	16—30 нм	450	1520
Al_2O_3	2,5—3,95	1,3—3,0	115—420	0,35—1,2	—	—	3—25	1000—1400	1800—2500
SiC	2,55—3,4	2,5—4,0	180—450	—	100—150	130—200	10—143	1000—1350	3100
TiC (Tyranno)	2,4	2,5	120	2,2	104	50	1	1300—1600	—
ПЭТФ, лавсан	1,38	0,6	18	15	60	13	10—200	100	250
ПА-66	1,2	10	25	20	80	4	25	150	250
Kevlar 49/149Hm	1,45/1,47	3/2,4	135/160	3,5/1,5	210	93	12	250	360
Technora HM 50	1,39	3	75	4,3	210	54	12	250	350
Spectra 900, 1000 (СВМ ПЭ)	0,96	2,65—3,12	117 (до 170)	3,5	310	120	38	100—120	180
Борное	2,5—2,76	2,35—3,8	363—420	0,6—1,0	—	—	96—203	300	2000
Вольфрам (волоченое)	19,2—19,3	3,3—4	402—410	—	20	20	10 (до 250)	800	3400
Жаростойкая сталь (волочение)	7,8—7,9	4—4,13	176—200	—	50	20	50—100	—	1620
Бериллий	1,85	1,1—1,3	290—310	—	71	163	130	—	1285
Тантал	11,66	0,62	193	—	37	11,6	—	—	3000
Титан	4,5—4,7	0,55—1,93	115—120	—	27—41	22—27	—	—	1670
Алюминий	2,68—2,7	0,29—0,62	70—73	—	23	27	—	300	660

* Температура сублимации.

деляет многие функциональные свойства, формирует межфазный слой при контакте с наполнителем, благодаря смачивающей способности связующего, которая определяется соотношением поверхностных энергий компонентов (поверхностное натяжение жидкого связующего (23—50)10^{-3} Н/см, критическое поверхностное натяжение смачивания γ_c = = 18 · 40 дин/см, поверхностное натяжение растекания больше 45 · 10^{-3} Н/см; поверхностная энергия (эрг/см^2): металлов — более 1300, аморфного кварца — 260, алюмоборосиликатных стекол — 425, углерода — 50—70, полимеров — 30—60).

Межфазный слой — часть объема матрицы (в органопластиках и часть объема наполнителя), в котором свойства под влиянием физического и химического взаимодействия с поверхностью наполнителя существенно изменились. Он существенно влияет на когезионное и адгезионное разрушение ПКМ в объеме и на границе раздела фаз, на характер и величины напряжений, возникающих в матрице.

Большой ассортимент полимерных матриц позволяет провести их целенаправленный выбор для ПКМ с заданными свойствами. По комплексу свойств наиболее полно отвечают современным требованиям матрицы на основе модифицированных эпоксидных связующих, малеинимидные матрицы и составы на основе смесей имидообразующих мономеров.

При разработке матриц учитывают сложный комплекс требований к ним: высокие, упруго-прочностные свойства (повышение прочности термореактивных матриц до 250 МПа, в перспективе — до 500 МПа за счет использования химически индивидуальных олигомеров, а не их смесей — смол; использование полиариленов и полигетероариленов вместо карбоцепных, у которых σ^+ в 200 раз ниже прочности связи С—С), высокая термоустойчивость (тепло-, термо-, огнестойкость по показателям горючести, дымовыделения, токсичности продуктов горения, FST-свойства, flammability, smoke, toxity; замена эпоксидных матриц на малеимидные, если требуемая теплостойкость превышает 150 °С с обеспечением FST-свойств), низкое водопоглощение (повышение трещиностойкости, устранение на микроуровне дефектов, стимулирующих осмо-

тический механизм насасывания воды, уменьшение концентрации третичных азотов в малеимидных матрицах, отвержденных аллильными отвердителями, снижение равновесного водопоглощения в 2—5 раз). Реализация оптимальной структуры ПКМ обеспечит повышение их прочности σ^+ до 2,35 ГПа при 250 °С (для МКМ $\sigma^+ \geqslant 1{,}45$ ГПа при 450 °С) [2].

Особенности механических свойств ВПКМ

При прогнозировании прочности $\sigma_{км}$ и модуля упругости ПКМ (и многих других свойств) используют правило аддитивности:

$$\sigma^+_{км} = K_1(K_2\sigma_м V_м + K_2\sigma_в V_в),$$

где K_1 — комплексный коэффициент, характеризующий особенности структуры КМ; K_2 — коэффициент, характеризующий тип деформирования; $\sigma_м$, $\sigma_в$, $V_м$, $V_в$ — соответственно разрушающие напряжения при растяжении и объемное содержание матрицы и волокон.

В зависимости от характера деформирования компонентов КМ ($\sigma_{тм}$, $\sigma_{тв}$ — пределы текучести матрицы и волокна, $\sigma_{тм}$ — напряжение в матрице при предельной деформации волокна):

$\sigma^+ = K_3(\sigma_в V_в + \sigma_{тм} V_м)$ — волокна деформируются упруго, матрица — пластически (стеклопластики, углепластики и др.);

$\sigma^+ = K_3(\sigma_{тв} V_в + \sigma_{тм} V_м)$ — волокна и матрицы деформируются пластически (органопластики).

При таком подходе прочностные свойства ПКМ во многом определяются свойствами наполнителя (доля $\sigma_м V_м \leqslant 5$ %). Однако свойства ПКМ зависят от соотношения свойств матриц и наполнителей, определяющих взаимодействие компонентов, вязкость разрушения, трещиностойкость, монолитность, практически весь комплекс технологических и эксплуатационных свойств ПКМ.

Так как $\sigma_{км} \approx K_1\sigma_в V_в$ и $E_{км} \approx K_1 E_в V_в$, то для получения высокопрочных и высокомодульных ВПКМ необходимо использовать высокопрочные и высокомодульные волокна. Один из способов оптимизации конструкционных свойств КМ — оптимальный объем фазы наполнителя, ВПКМ — объем волокон, который изменяется в широких пределах в зависимости от типов упаковки волокон в матрице ($V_в$, %): тетрагональная (объемно-центрированная кубическая) — 78,5; гексагональная — 90,7; статистически плотная — 82,0; хаотически-ориентированная — 52; с волокнами разного диаметра — 92,4.

Повышение $V_в$ до 95 % (и даже 99 %) (предельное армирование) может быть реализовано при использовании профильных волокон. Перепрофилирование стеклянных волокон сопровождается ростом концентраторов напряжений (углы гексагонального сечения), полимерных (фенилоновых) волокон — изменением ориентированной структуры и механизма перераспределения напряжений из-за малого объема матрицы.

Допустимый объем волокон в матрице зависит от их диаметра $Д_в$ и минимально возможного расстояния между волокнами σ_{min}, обеспечивающего непрерывность матрицы:

$$V_в \approx 0{,}846/(1 + \sigma_{min}/Д_в)^2,$$

хотя критический объем волокон $V_{в\ крит}$, обеспечивающий эффект упрочнения, значительно ниже:

$$V_{в\ крит} = \frac{\sigma_м - \sigma_{тм}}{\sigma_в - \sigma_{тм}} \cong 20\ \%.$$

Благодаря прочности $\sigma_м - \sigma_{тм}$ (деформационное упрочнение матрицы), после разрушения волокна матрица перераспределяет напряжения (если сохраняет непрерывность и контакт с волокнами) на неповрежденные волокна.

В реальных ВПКМ $V_{в\ опт}$ определяется как составом и структурой композиции, так и условиями нагружения. Содержание волокон в однонаправленных эпоксидных углеволокнитах, обеспечивающее оптимальные свойства при различных условиях нагружения, приведено в табл. 2.

Изготовление ПКМ начинается с процесса приготовления связующего и для композиции решающими являются вязкостные характеристики связующих. Реологические свойства связующих оказывают существенное влияние на выбор параметров процесса совмещения компонентов (пропитка), формирования полуфабрикатов и организацию технологического процесса формования изделий. Специфика ПКМ часто предопределяет разделение производства наполнителей (нитей, лент, тканей) и матриц (связующих) с последующими операциями изготовления изделий, в том числе через стадию препрегов (специализированное производство).

Современные тенденции в области матриц ПКМ связаны с модифицированием полимеров традиционных классов с целью получения материалов,

Таблица 2

Вид нагружения		$V_{в\ опт}$, %
Растяжение	σ^+_{11} (||)	64—68
	σ^+_{22} (⊥)	50—54
Сжатие	σ^-_{11} (||)	60—64
	σ^-_{22} (⊥)	54—58
Межслойный сдвиг τ_{12}		58—62

Обозначения: ⊥ — перпендикулярно, || — параллельно.

удовлетворяющих современным требованиям, предъявляемым к связующим для ПКМ (как технологическим, так и эксплуатационным), с необходимостью обеспечения оптимальных условий получения полуфабрикатов (например препрегов) и соответствия состава и свойств связующих выбранному технологическому приему формования (жидкофазная и твердофазная намотка, пултрузия, роллтрузия, вакуумное, автоклавное, термокомпрессионное формование, прессование, спекание) с разработкой и использованием новых типов неорганических, элементоорганических и органических (карбо- и гетероциклических) полимеров. Необходимость использования непрерывных нитей и волокон взамен лент и тканей для повышения прочности ВПКМ до 2—2,5 ГПа (при σ^+ = 1 ГПа в самолете объем использования ВПКМ составляет 20 %, при σ^+ = = 2 ГПа $\geqslant$ 40 %) привела к разработке пленочных связующих и клеев (для сборки сотовых конструкций). Низкая влагостойкость, огнестойкость и трещиностойкость эпоксидных матриц стимулировали их модифицирование (например использование ЭДТ-69Н взамен ЭДТ-10) и переход к малеинимидным матрицам.

Природа дефектов в полимерных матрицах различна и во многом определяется составом и технологией изготовления связующих для термоактивных матриц и условиями формирования матриц с пространственной структурой при отверждении. Полимерные сетки весьма дефектны, имеют микрогелевую структуру с высоким уровнем остаточных напряжений, низкими показателями прочности и модуля упругости.

Переход к полиараленам (ПЭЭК, полифениленсульфиды) и полигетероариленам (полиимиды) позволяет существенно повысить упругопрочностные свойства, хотя вязкость расплавов таких полимеров составляет 10^4—10^8 Па · с при 300—380 °С [2].

Деформационная совместимость компонентов и монолитность ВПКМ

Для ВПКМ с высокопрочными и высокомодульными волокнами необходимо обеспечить деформационную совместимость компонентов и монолитность композиции. Деформационная совместимость компонентов обеспечивает монолитность ПКМ и наряду с физико-химической совместимостью (смачивание, адгезия, теплофизические свойства) имеет важнейшее значение для реализации свойств волокон в ПКМ, которые несут основную нагрузку (при упругом деформировании напряжения в волокне в 20—40 раз больше напряжений в матрице) [3].

Даже при простейшем виде деформирования — растяжении однонаправленных ВПКМ вдоль волокон в объеме ВПКМ возникает сложно-напряженное состояние. Наличие прочной связи между компонентами ВПКМ обусловливает появление в матрице и на границе раздела радиальных, тангенциальных и осевых напряжений. Вследствие различия в ТКЛР волокон и матрицы ($\alpha_м > \alpha_в$) при охлаждении ниже температуры формования в ВПКМ возникают напряжения. Объемно-напряженное состояние создается в связи с различием значений коэффициентов Пуассона матрицы $\upsilon_м$ и волокон $\upsilon_в$. Величины окружных и касательных напряжений из-за суммирования остаточных термических внешних напряжений соизмеримы с прочностью матрицы и прочностью сцепления $\tau_{сц}$ на границе раздела.

Понятие монолитности ВПКМ предполагает сплошность компонентов, отсутствие нарушения связи на границе раздела при деформировании ВПКМ до тех пор, пока не разрушатся волокна. Для ВПКМ необходимы матрицы и наполнители с конкретно задаваемым соотношением упруго-прочностных свойств. Независимо от вида нагружения условия сплошности описываются системой числовых неравенств между механическими характеристиками волокон и матриц, прочностью их сцепления при сдвиге и отрыве, обеспечивающих их совместную работу в ВПКМ, с учетом объемов наполнителя и матрицы [3].

При этом обязательно выполнение всех условий монолитности:

$$E_м/E_в \geqslant 0{,}06 + 0{,}064;$$

$$\varepsilon_м/\varepsilon_м \geqslant 1{,}5 \text{ при } \varepsilon_м \geqslant 3 + 5\ \%;$$

$$\tau_м \geqslant \tau_{сц} \text{ при } \tau_м = (0{,}60 + 0{,}75)\sigma_в;$$

$$\tau_{сц}/\sigma_в \geqslant 0{,}040—0{,}060;$$

$$\sigma_м/\sigma_в \geqslant 0{,}06—0{,}07,$$

где E — модуль упругости; ε — деформация; τ — напряжение сдвига; σ — напряжение растяжения (индексы “в” соответсвуют волокну, “м” — матрице, “сц” — прочности сцепления-взаимодействия).

При одновременном нагружении и нагревании до температуры T учитывается и разница в коэффициентах теплового расширения $\alpha_м$ и $\alpha_в$. Тогда

$$\sigma_м/\sigma_в \geqslant 0{,}06 - (\alpha_м - 2{,}33\alpha_в)T\varepsilon_м/\sigma_в;$$

$$\varepsilon_м/\varepsilon_м \geqslant 1{,}5 + (0{,}3\alpha_м + \alpha_в)T\varepsilon_в;$$

$$\tau_{сц}/\sigma_в \geqslant 0{,}04 + 0{,}06(\alpha_м - 2{,}33\alpha_в)TE_м/\sigma_в;$$

$$E_м/E_в \geqslant 0{,}064/1 - 1{,}2T(\alpha_м - 2{,}33\alpha_в).$$

Требования к свойствам матриц, указанные выше, вытекают из условия сохранения монолитности материала. Они в значительной степени превосходят уровень свойств промышленных отвержденных (густосетчатых) полимеров (табл. 3) [3].

Таблица 3

Свойство волокона	σ^+, МПа E^+, ГПа ε^+, %	2350 75 3	4200 100 3,5
Требуемое свойство матрицы	σ^+, МПа E^+, ГПа ε^+, %	140 4,5 4,5	250* 5,7 5,25
Свойство межфазного слоя	$\tau_{сц}$, МПа	94	168*

* Труднодостижимые показатели.

Для повышения свойств ПКМ необходимы матрицы с $\sigma \geqslant 250$ МПа, относительным удлинением выше 3 %, деформационной теплостойкостью 200—300 °С и водопоглощением не выше 1 %. Более перспективным является применение в качестве матриц линейных жесткоцепных полимеров, G_c которых колеблется в пределах 1700—3900 Дж/м^2.

У жесткоцепных матриц прочность при растяжении составляет 90—200 МПа, при изгибе — 110—250 МПа, модуль упругости — 3500—6500 МПа, относительное удлинение — до 15 % (при плотности 1,2—1,3 г/см^3 и теплостойкости 250—300 °С).

Свойства термопластичных матриц (например ПЭЭК) ближе к рассчитанным показателям идеального матричного компонента ВПКМ, однако по технологическим причинам сложно обеспечивать требуемое значение прочности $\tau_{сц}$ на границе контакта термопластичная матрица—наполнитель.

Механические свойства ЖКП близки к механическим свойствам типичных термопластов с объемным содержанием дисперсного наполнителя 30 %. Жесткие блоки в ЖКП упрочняют полимер, а при оптимальном содержании мезофазы вязкость расплава составляет 10—100 Па · с. ЖКП являются основой самоармирующихся молекулярных ПКМ. Молекулярные композиты при плотности 1,35 г/см^3 характеризуются прочностью при растяжении 140—160 МПа, при изгибе — 180 МПа, относительным удлинением 5 % и теплостойкостью до 360 °С. Кроме ПЭЭК и ЖКП перспективны в качестве матриц ВПКМ полисульфоны, полифениленсульфиды, полиимиды [2].

Критическая длина волокна

Практически все параметры деформирования ВПКМ зависят от свойств волокон, матрицы и прочности ее сцепления с наполнителем.

Под действием нагрузки в пограничном слое возникают напряжения, которые передаются по длине волокна неравномерно. Волокна состоят из отдельных звеньев, длина которых равна статистически определяемому расстоянию между локальными дефектами волокон. Минимальная длина волокон $l_{крит}$, при которой касательные напряжения на границе раздела с матрицей при передаче внешней нагрузки на волокна, оказывается достаточной для реализации свойств волокон и должна быть меньше расстояния между дефектами:

$$l_{крит} = \frac{\sigma_в^+ d_в}{2\tau_{сд}} = \frac{E_в^{0,5} d_в}{G_м^{0,5}},$$

где $\sigma_в$, $E_в$ — прочность и модуль упругости волокна; $d_в$ — диаметр волокна; $\tau_{сд}$ — касательные напряжения на границе волокно—матрица; $G_м$ — модуль сдвига матрицы.

Так как $\tau_{сд} \cong \sigma_{тм}/\sqrt{3}$, $l_{крит} = 0{,}86\sigma_в d_в/\sigma_{тм}$,

$\tau_{сд} = c\sigma_в\sqrt{G_м/E_в}$, где c — уровень адгезионного взаимодействия, равный 0,1—1,0.

Оценка вклада химических взаимодействий матрица—волокно (A) и за счет сил трения (шероховатость поверхности, текстура лент, тканей ($Б$)

$$\tau_{сд} = 375A + 8{,}78Б - 10{,}319$$

показывает, что решающим является вклад в величину $\tau_{сд}$ за счет организации химического контакта матрица—волокно (A в 40 раз больше $Б$).

Для ВПКМ, использующих в технологии нагрев (при отверждении термореактивных ПКМ из-за химических реакций сокращение расстояний с 0,3—0,4 нм до длины ковалентной связи ~0,15 нм; при стекловании, кристаллизации уменьшается свободный объем, тепловые и химические усадки), наибольший вклад в значение $\tau_{сд}$ связан с фрикционной составляющей (для теплопроводных ВПКМ он меньше), возникающей за счет давления p на границе волокно—матрица из-за разницы $\alpha_в$ и $\alpha_м$:

$$p = \frac{(\alpha_м - \alpha_в)\Delta T E_м}{(1+\nu_м) + (1+\nu_в)E_м/E_в},$$

где $\Delta T = T_с - 20$ °С ($T_с$ — температура стеклования, отверждения, кристаллизации); $\nu_м$, $\nu_в$ — коэффициенты Пуассона.

Величина $l_{крит}$ определяет как критический объем волокон $V_{в\ крит}$ в ВПКМ

$$V_{в\ крит} = \frac{1}{1 + \dfrac{\sigma_в}{\sigma_в - \sigma_{тм}}\left(1 - \dfrac{l_{крит}}{l}\right)},$$

так и прочность ВПКМ в зависимости от реальной длины волокон l, используемых в качестве наполнителя.

При $l > l_{крит}$

$$\sigma_{км} = \sigma_в V_в \left[1 - (1 - \beta)\frac{l_{крит}}{l}\right] + \sigma_м(1 - V_в).$$

Здесь $\beta = 1$ (матрица и волокна идеально упруги), $\beta = 0{,}5$ (матрица и волокна идеально пластичны), $\beta = 0{,}9$ (для высокомодульных ВПКМ, углеволокниты, волокниты с SiC-волокнами и с волокнами, у которых $E^+ > 250$ ГПа).

Разрушение адгезионного взаимодействия концов волокон с матрицей неизбежно, так как оно и $\tau_{сд}$ полимеров ниже $\sigma_в^+$. Передача усилий от матрицы на волокно возможна, так как на концах волокон возникают дополнительные силы, предотвращающие смещение волокон относительно матрицы — силы трения. Расчетная длина $l_{крит}$ должна быть увеличена на удвоенную длину фрикционного участка и реальная длина волокна $l = 10—100 l_{крит}$. При $l/l_{крит} > 10$ ВПКМ с короткими ориентированными волокнами имеют 95 % прочности ВПКМ с ориентированными непрерывными волокнами. Эффективность армирования достигается только при $l_{крит}/d_в > 100$ (до 350 и более), что связано со сложностью организации контакта волокно—матрица и сохранения его при эксплуатации изделий из ВПКМ. Критическая длина волокна определяется в основном организацией взаимодействия с использованием методов регулирования поверхностной энергии наполнителя и поверхностного натяжения жидкой полимерной матрицы перед стадией совмещения компонентов при изготовлении композиции.

Универсальных способов обработки поверхности наполнителей нет, хотя часто эти операции называют аппретированием. Повышение $\tau_{сц}$, $\tau_{сд}$ достигается использованием поверхностно- и химически активных, чаще всего кремнийорганических, веществ (аппретирование, снижение поверхностной энергии высокоактивных минеральных поверхностей, аппретирование стеклянных, кварцевых, базальтовых, SiC-волокон), электрохимическим окислением (метод ЭХО, повышение поверхностной энергии углеродных волокон), обработкой поверхности полимерных волокон тлеющим, коронным разрядом, активацией их поверхности. Целенаправленная обработка поверхности снижает $l_{крит}$ углеродных волокон с 0,35—0,6 мм до 0,1—0,2 мм (метод ЭХО), борных волокон — до 1,6—2,0 мм, стеклянных волокон — до 0,16—0,5 мм.

Так как $\sigma^+_{ВПКМ} \cong 1 - l_{крит}/l$, использование непрерывных волокон позволяет повысить упруго-прочностные свойства ВПКМ и применять высокопроизводительные технологические приемы формирования полуфабрикатов (препрегов) и формования изделий из них (намотку, пултрузию и др.).

Трещиностойкость ВПКМ

В ВПКМ осуществляется эффективное перераспределение напряжений деформирования от матрицы к волокну, которое деформируется в соответствии со своими упруго-деформационными характеристиками до разрыва, обеспечивая упрочнение гетерофазной системы. Исчерпание прочности волокон позволяет достичь теоретического предела прочности ВПКМ при выполнении двух условий: отсутствия продольного растрескивания и низкой концентрации напряжений вблизи дефектов [3, 4].

Качество контакта компонентов в ВПКМ характеризуют конечными значениями $\tau_{сц}$, $\tau_{сд}$, которые следует характеризовать как соотношение когезионных и адгезионных взаимодействий. Удельный вклад адгезионной и когезионной прочности матрицы в прочность ВПКМ при растяжении превышает удельный вклад деформативности матрицы в 15,8/1,42 и 15,8/5,3 раза соответственно. В зависимости от соотношения между прочностью матрицы, волокна и прочностью их сцепления на границе раздела при каждом виде деформирования возможны три случая разрушения ВПКМ: когезионное по матрице ($\sigma_в > \sigma_{сц} > \sigma_м$), когезионное по волокну ($\sigma_м > \sigma_{сц} > \sigma_в$) и адгезионно-когезионное по межфазной границе и по матрице ($\sigma_в > \sigma_м \geqslant \sigma_{сц}$).

Разрушение и рост исходной трещины (дефекта) начинается, если напряжение у вершины трещины достигает предела прочности материала. Распределение напряжений у вершины трещины существенно зависит от того, является ли матрица упругой или пластичной. В случае термопластичных и термореактивных матриц и ВПКМ в вершине трещины наблюдается зона пластической деформации. В зоне пластичности матрицы сдвиговые напряжения равны пределу ее текучести при сдвиге.

Оптимальные значения предела текучести матрицы уменьшаются при увеличении модуля упругости волокон. Использование матриц с повышенными прочностными и адгезионными характеристиками может привести к хрупкому разрушению ВПКМ.

При излишнем снижении этих характеристик проявляется опасность растрескивания ВПКМ из-за наличия сдвиговых и трансверсальных растягивающих напряжений, либо из-за эффекта Пуассона, либо вследствие отклонения напряженного состояния от идеального одноосного. Как при растяжении, так и при хрупком разрушении свойства матрицы влияют на прочность ПКМ гораздо сильнее, чем при разрушении вследствие исчерпания прочности волокон.

Прочность при сжатии σ^- находится в прямой зависимости от прочности сцепления матриц с волок-

ном. Предел прочности при сжатии полимерных матриц в силу специфического строения полимеров выше σ^+ и предела прочности при изгибе $\sigma_{ви}$, но сжатие ПКМ описывается спектром механизмов разрушения, в каждом из которых роль матрицы различна. Для противостояния разрушению при сжатии нужны матрицы с высокими значениями $G_{сд}$, σ > 200 МПа.

Для повышения конструкционных свойств ПКМ необходимо учитывать соотношения $E_в/E_м$ и $G_в/G_м$, особенно при их нагружении в трансверсальном направлении и при сдвиге.

Увеличение пористости с 1 до 9 % снижает $\sigma_{ви}$ ПКМ в 1,5—2 раза. Ползучесть ПКМ уменьшается с увеличением модуля длительной упругости матрицы.

При повышении прочности матрицы до (0,05—0,07)$\sigma_в^+$ (до 200 МПа) усталостная прочность ПКМ может составлять 800—1200 МПа [4].

С ростом модуля упругости армирующих наполнителей (волокон) необходимы матрицы с резко улучшенной деформативностью, ударной вязкостью и трещиностойкостью. Характеристики ударной вязкости a_k матриц и ПКМ качественными параметрами по Изоду (Дж/м) и Шарпи (Дж/м^2) с надрезом и без надреза образцов следует считать устаревшими (как и теплостойкость матриц и ПКМ по Мартенсу, $T_м$). Для характеристики ударной вязкости и трещиностойкости используют показатели удельной поверхности разрушения γ_k, коэффициент интенсивности (силовой параметр) K_c, энергетический параметр:

$$G_c = \gamma\sqrt{2E\gamma_F/C},$$

где γ — константа, являющаяся функцией формы и размера образца; $C = \pi a$ (a — характерный линейный размер опасного дефекта — трещины).

Более удобен для расчетов коэффициент интенсивности

$$K^2 = \gamma'\sigma_{крит}c,$$

при достижении критического значения которого происходит разрушение:

$$K^2 = EG_c, \quad G_c = 2\gamma_F.$$

Трещиностойкость ВПКМ симбатно коррелирует с трещиностойкостью матриц. Для практических целей используют и показатели трещиностойкости, характеризующие остаточную прочность ВПКМ при сжатии после ударной нагрузки с энергией 3,3, 4,5, 6,7 и 9,0 кДж/м ($CAI_{3,3}$, $CAI_{4,5}$, $CAI_{6,7}$, CAI_9 — стандарт 7260 фирмы Boeing, США) и 265 Дж/м^2 (стандарт фирм Boeing и Northrop).

Критерии ЛУМР G_c, K_c, γ_F позволяют рассчитать предельные напряжения, которые выдержит материал:

$$\sigma_x = Y\sqrt{\frac{EG_c}{\pi a}} = Y\sqrt{\frac{E\gamma_F}{2\pi a}} = Y\sqrt{\frac{E_xQ_{xz}}{\pi a}},$$

где a — характерный размер опасного дефекта.

При разрыве одного волокна $a = d_в$, но если в ВПКМ имеются пучки контактирующих волокон, то трещина, образующаяся при разрушении одного волокна, перерезает все волокна пучка и длина трещин становится равной $a = nd_в$. Критерий Q_{xz}, характеризующий эффективность поглощения энергии при деформации в зоне устья трещины,

$$Q = V_м^2 V_в^{-1}\sigma_м\varepsilon_м d_в.$$

Если напряжение в ВПКМ $\sigma_{x\,крит}$ < < $V_м(E_в\sigma_м\varepsilon_м/\pi n)^{0,5}$, то разрушение отдельных волокон не будет вызывать катастрофического разрушения ВПКМ.

Чем больше вязкость разрушения ВПКМ, тем больше критический размер трещин или другого дефекта, приводящего к разрушению ВПКМ.

Условиями, способствующими распространению трещин, инициируемых разрушением отдельных волокон, являются повышение прочности сцепления волокно—матрица, увеличение объемного содержания волокон, неравномерность распределения волокон по объему материала, уменьшение $\varepsilon_м^+$.

Коэффициент интенсивности напряжений K_{I_c} = = $\sigma/(\pi a)^{0,5}$, где a — полудлина трещины (по ISO 13586:2000, 15024:2001), пропорционален прочности ВПКМ и волокон и для большинства КМ K_{I_c}/σ_x = = 0,08 мм^{0,5}.

Вязкость разрушения повышается при использовании волокон большого диаметра, использовании матриц с высокими значениями G_c, K_c, ε, $E_м$, увеличении толщины ВПКМ, оптимальном армировании (например ВПКМ со структурой [O_4/±45]).

С увеличением $\tau_{сд}$ меняется характер распространения трещин. Углеволокниты с волокнами (ЭЛУР-П), поверхность которых активирована методом ЭХО, разрушаются в плоскости, перпендикулярной направлению армирования, многократно меняется направление роста трещин, вязкость разрушения повышается на 5—15 %. Углеволокниты с неактивированными волокнами разрушаются как в плоскости, перпендикулярной ориентации волокон, так и путем расслаивания [4].

Регулирование (оптимизация) свойств ВПКМ

Свойства ВПКМ определяются не только составом, природой и свойствами матриц, наполнителей, качеством контакта между ними, но и в значительной степени структурой ВПКМ. Регулирование (оптимизация) свойств ВПКМ достигается:

— использованием волокон и матриц различной химической природы, определяющей их упругопрочностные и другие свойства, с различным объемным содержанием компонентов;

— оптимальным армированием, когда по распределению напряжений в конструкции задаются свойства КМ, созданием анизотропной структуры путем соответствующей схемы армирования для достижения максимальных упругопрочностных характеристик ВПКМ в направлении действия напряжений, согласованием поля действующих напряжений с полем сопротивления материала (ВПКМ с планируемой анизотропией свойств);

— использованием наполнителей различной текстуры с различной степенью искривленности волокон, регулированием толщины слоев с различной ориентацией (схемой армирования) волокон;

— использованием различных технологических приемов формирования изделий;

— использованием комбинации волокон различной химической природы (межслоевые и внутрислоевые поливолокнистые ВПКМ, гибридные ВПКМ, регулирование упругопрочностных свойств при статическом и динамическом нагружении, повышение критических параметров гибридных стеклоорганопластиков, углеорганопластиков, стеклоуглепластиков по сравнению с σ, E, G_c индивидуальных стекло-, угле-, органопластиков);

— сочетанием материалов различной химической природы (многослойные супергибридные КМ, металлополимерные типа Алор, Сиал, полимерно керамические броневые материалы).

Среди разнообразных структур ВПКМ (однонаправленных, ортотропных, с планируемой анизотропией) однонаправленные ВПКМ используют для выбора, анализа возможностей, сравнения свойств ВПКМ различного состава.

Для расчета свойств ВПКМ с требуемой анизотропией свойств используют показатели свойств однонаправленных волокнитов $\sigma_{\parallel}^{+}$, $\sigma_{\perp}^{+}$, $\sigma_{\parallel}^{-}$, $\sigma_{\perp}^{-}$, $E_{\parallel}^{+}$, $E_{\perp}^{+}$, $\upsilon_{\parallel}$, $\upsilon_{\perp}$, $\alpha_{\parallel}$, $\alpha_{\perp}$, $V_{\text{волокон}}$, $G_{\text{сд}}$.

Расчетные данные затем используют при конструировании ВПКМ с требуемой анизотропией свойств.

При сложных схемах армирования ПКМ необходимо [3, 4]:

— увеличивать содержание матрицы в слоях, расположенных трансверсально по отношению к основной нагрузке;

— применять для трансверсальных слоев матрицы с деформативностью, превышающей деформативность матрицы в нулевых слоях;

— ориентировать трансверсальные слои под углами ±75—±80°, чтобы увеличить деформативность трансверсальных слоев в направлении нагружения за счет деформации сдвига.

В диапазоне углов армирования 0—90° коэффициенты анизотропии E_0/E_{90} и Пуассона изменяются более чем в 20 раз, $G_{\text{сд}}$ в плоскости — в 3—4 раза. Отклонение ориентации на углы ±5° снижает упругие характеристики на 5—10 %.

Комбинированные схемы армирования дают значительный эффект. Так, углеволокнит [0, 75 %, +45°, 25 %] при снижении E_x на 16 % имеет E_y в 1,7 раза, G_{xy} и E_{45} в 2,7 раза более высокие по сравнению с однонаправленным.

Свойства ВПКМ при динамическом нагружении

Структура и состав ПКМ, ВПКМ определяют их поведение в условиях динамического нагружения (циклического, ударного, термоциклического) и позволяют эффективно регулировать такие параметры, как усталостная прочность, демпфирующая способность, вибропрочность, термонагруженность.

Состав и структура ПКМ, ВПКМ в полной мере соответствуют основному способу направленного регулирования параметров динамических вязко-упругих свойств, заключающемуся в создании гетерофазных систем с резко различными временами релаксации сегментов в фазах, систем с несовместимыми компонентами.

Вязкоупругие свойства полимеров и полимерных материалов в динамических условиях характеризуются возникновением в них затухающих колебаний, определяемых значениями логарифмического декремента затуханий, мерой демпфирующей способности материала $\theta = \ln A_i/A_{i+1}$, где $A = A_0 e^{-\alpha t}$, $\alpha = \theta\omega = \pi\,\mathrm{tg}\,\delta\omega$ и вынужденных колебаний

$$\sigma_{(\omega)} = \sigma_A e^{-i\omega t};$$

$$\varepsilon_{(\omega)} = \varepsilon_A e^{-i(\omega t - \delta)};$$

$$\sigma_{(\omega)}/\varepsilon_{(\omega)} = E^*;$$

$$E^* = E' - iE'';$$

$$E''/E' = \mathrm{tg}\,\delta,$$

где E' — упругая составляющая, отвечающая за накопление энергии и ее возвращение; E'' — вяз-

кая составляющая, потери на внутреннее трение; $\mathrm{tg}\delta$ — тангенс угла механических потерь.

Тангенс угла механических потерь $\mathrm{tg}\delta$ и температурный интервал эффективного вибропоглощения $\Delta T_{эфф}$ определяют уровень вибропоглощения. Высокая эффективность применения ПМ и ПКМ для снижения вибрации (и шума) обусловлена специфической особенностью полимеров, заключающейся в повышенной способности к диссипации внешней энергии. Молекулярный механизм поглощения энергии колебаний в полимерах объясняется теорией релаксации, в основе которой лежат процессы перехода полимерной системы к состоянию термодинамического равновесия за счет реализации молекулярного движения различных видов, сопровождающегося диссипативными потерями энергии. Каждому виду молекулярного движения соответствует релаксационный процесс, характеризующийся определенным значением энергии активации и своим временем релаксации. Для любого релаксационного процесса характерно проявление резонансного максимума на кривой температурной зависимости коэффициента механических потерь (наиболее интенсивный релаксационный переход и наибольшая диссипация энергии соответствуют переходу полимера из стеклообразного в эластическое состояние). У гомополимеров область перехода (высота пика механических потерь может быть значительной) перекрывает незначительный частотный и температурный диапазон. В широких пределах ($\mathrm{tg}\delta = 0{,}1 \div 0{,}3$, частота — 5—10 000 Гц) изменяются параметры при сополимеризации, при изменении природы и количественных соотношений звеньев как в основных цепях макромолекул, так и в боковых звеньях, что используется при целенаправленном конструировании вибропоглощающих композиций.

ПКМ, ВПКМ на основе полимеров с высокими значениями $\mathrm{tg}\delta$ имеют высокий уровень вибропоглощения (рассеивания в виде теплоты механической энергии, подводимой в условиях циклического нагружения). В результате снижается амплитуда колебаний конструкций и уменьшаются связанные с такими колебаниями нежелательные эффекты, что приводит к повышению надежности и улучшению технических параметров.

Динамическая усталость материалов является одной из основных причин, ограничивающей ресурс работы конструкций в машиностроении (в авиастроении — оболочки, лопатки, конструкции механизации крыльев, стабилизаторов и др.).

Для большинства ВПКМ зависимость σ—$\ln N$, где N — число циклов нагружения, — горизонтальная асимптота и термин "предел усталости" неприменим. Используют условный предел усталости, при котором ВПКМ выдерживает определенное число циклов ($N10^7$, $2N10^7$) нагружения:

$$\sigma_{xN} = \sigma_{м} V_{в} \frac{E_{в}}{E_{м}} x,$$

где $x = \varepsilon_{мN}/\varepsilon_{м}$, $\varepsilon_{мN}$ — предельная деформация матрицы, при которой происходит усталостное разрушение ВПКМ. Если $\varepsilon_{м} = (0{,}05—0{,}07)\sigma^{+}$, т. е. около 200 МПа, σ_{xN} ВПКМ возрастает до 800—1200 МПа, σ_{xN} возрастает также и с ростом E^{+}.

Усталостное разрушение однонаправленных ВПКМ начинается с матрицы при достижении в ней определенного уровня напряжений (для углеволокнитов σ_N = 520 МПа, связующее — ЭНФБ, σ_N = 420 МПа, связующее — 5—211Б). Предел выносливости $(\sigma_{ПКМ})_N$ углеволокнитов для знакопеременного цикла составляет $(0{,}1—0{,}3)\sigma^{+}$, для знакопостоянного — $(0{,}3—0{,}5)\sigma^{+}$. Пределы выносливости углеволокнитов в основном определяются усталостными характеристиками матрицы (углеродные волокна практически не подвержены усталостным напряжениям) и прочностью контакта волокно—матрица. Оптимальный объем волокон $V_{в}$ устанавливают в зависимости от коэффициента асимметрии цикла нагружения (при знакопостоянном цикле нагружения $V_{в} = 60 \div 64$ %). Коэффициент усталостного сопротивления в зависимости от вида и степени асимметрии цикла равен $(0{,}5—0{,}7)\sigma^{+}$, т. е. в 2—3 раза выше, чем у стеклопластиков, что связано с высоким модулем упругости углеродных волокон и, как следствие, более низким уровнем напряжений и меньшей повреждаемостью матрицы [5].

Усталостная прочность существенно анизотропна. При изменении угла армирования от оси нагружения на ±15° усталостная прочность КМУ-1Л снижается на 25 %.

Демпфирующая способность — способность ВПКМ рассеивать механическую энергию при циклическом нагружении в упругой области за счет внутреннего трения. В ВПКМ имеет место упруговязкое рассеяние энергии, сопровождающееся переходом механической энергии в тепловую, химическую, электрическую. Демпфирование в ВПКМ слагается из потерь энергии механических колебаний вследствие деформации волокон, возникновения $\tau_{сд}$ в матрице, из-за трения на границе раздела. Из-за релаксационного характера высокоэластических деформаций происходит разогрев ВПКМ.

В качестве характеристики внутреннего рассеивания энергии в материале принят логарифмический декремент колебаний, определяемый по ширине резонансной кривой.

Логарифмический декремент затухания колебаний θ — мера деформирующей способности материала конструкций, подверженных высокочастотным

динамическим нагрузкам, — определяет механизм усталостного разрушения ВПКМ (механический или тепловой); θ возрастает с ростом $V_в$, снижением $E_в$, увеличением искривления волокон (объемные текстуры), углов армирования и зависит от типа напряженного состояния, амплитуды напряжения. Разогрев ВПКМ при циклических нагрузках происходит из-за гистерезиса потерь и низкой теплопроводности. С повышением напряжений в 8—10 раз θ возрастает в 1,5—2 раза, что положительно сказывается на работе деталей при резонансных колебаниях. У ВПКМ θ в 5—10 раз выше, чем у металлов.

С увеличением модуля сдвига наблюдается монотонное снижение механических потерь, причем кривая представляет ветвь равносторонней гиперболы, а произведение коэффициента механических потерь на значение модуля сдвига — постоянная величина.

Большое влияние на логарифмический декремент затухания колебаний оказывает текстура армирующего наполнителя (табл. 4).

Степень демпфирования понижается с уменьшением искривленности волокон в композиции. Демпфирующая способность ВПКМ существенно зависит от угла между направлениями армирования и приложения нагрузки (максимальна при углах 15—30°). Уровень демпфирования углепластиков повышается в зависимости от текстуры наполнителя в ряду — кордные ленты (ЛУ-П, ЭЛУР), нити УКН, жгуты.

Демпфирующая способность углепластиков определяется в основном рассеиванием энергии в матрице, сопровождающейся переходом механической энергии в тепловую, химическую и электрическую, и существенно зависит от уровня нагружения, структуры армирования материала и рабочей температуры. Если однонаправленные углепластики имеют уровень демпфирующей способности вдоль волокон 0,5—1,0 %, то в диагонально-армированном углепластике она возрастает в 5—7 раз.

По сравнению с другими ВПКМ углепластики обладают меньшими удельной ударной вязкостью, трещиностойкостью и остаточной прочностью при наличии дефектов, т. е. большей чувствительностью к концентрации напряжений. Значительное влияние на чувствительность углепластиков к концентрации напряжений оказывают структура армирования и направление приложения нагрузки по отношению к ориентации волокон.

Таблица 4

Наполнитель в ПКМ	θ, %	
	Свободные колебания	Вынужденные колебания
Кордная тканая лента	0,8	1,5
Жгут	0,5	1,1

При растяжении под углом ±45° к направлению армирования прочность углепластика незначительно зависит от размера концентратора.

Источник демпфирования (амплитуда колебаний ограничивается величиной сил сопротивления) в ВПКМ — внутреннее упруго-вязкое рассеивание энергии. С ростом демпфирующей способности материала возможен переход от механического усталостного разрушения к тепловому (критический разогрев определяет податливость потерь и зависит от податливости матриц и их T_c: ЭДТ-10 — 60—80 °С, ЭТФ — 160—180 °С, полиимидные — более 280 °С):

$$\theta = 0{,}3\theta_м V_м E_м / E_{ВПКМ} K,$$

где K — коэффициент, учитывающий пористость ВПКМ и качество контакта волокно—матрица.

Повышение K (например, в результате аппретирования, обработки углеродных наполнителей электрохимическими окислениями, ЭХО) существенно снижает θ (при использовании лент ЛУ-ЗП — на 55 %).

Анизотропия демпфирующей способности имеет ярко выраженный характер, причем экстремальные значения находятся для углепластиков в диапазоне углов армирования 15—30°, для стеклопластиков — 30—45° [4].

Анизотропия демпфирования и усталостной прочности используется для конструирования ВПКМ с максимальной вибропрочностью.

Вибропрочность $\sigma_N\theta$ определяет собственную частоту колебаний материала, зависящую в значительной степени от демпфирующих свойств и ориентации волокон в ВПКМ ($\sigma_N\theta$ имеет максимальные значения в диапазоне углов армирования 15—30°).

При действии нагрузок под углом армирования σ_N уменьшается, θ возрастает. В ВПКМ $(\sigma_N\theta)_{max}$ достигается углами укладок 75° (УП, углепластики, боропластики, БП), 90° (СП, стеклопластики), определяется уровнем деформаций при сдвиге. При изменении ориентации волокон относительно оси нагружения можно изменить собственные колебания пластин из СП в 1,6 раза, УП — в 2,5 раза, БП — в 3 раза. Во избежание резонансных колебаний достаточно на 15—20 % изменить собственные частоты (эффективное средство повышения вибрационной надежности изделий) [4].

Значения θ и $\sigma_N\theta$ ВПКМ существенно превосходят эти показатели для металлов (табл. 5).

Демпфирующая способность, вибро- и усталостная прочность ВПКМ зависят от угла ориентации волокон. Это позволяет регулировать в требуемом направлении резонансную частоту колебаний детали (например лопатки) путем изменения схемы

Таблица 5

Материал	σ_N, МПа	θ, %	$\sigma_N\theta$, МПа
Титан ВТ-8	500	0,03	15
Сталь 18ХНВА	550	0,06	330
Стекловолокнит	200	1,5	300
Бороволокнит	350	0,5	175
Углеволокнит	350	1,2	420

укладки волокон без изменения геометрических размеров детали, что совершенно исключается при применении металлов. Для получения требуемого уровня деформаций и повышения устойчивости элементов конструкций (например лопаток ГТД к изгибно-крутильному флаттеру) необходимы ВПКМ с максимальной изгибной и крутильной жесткостью. Уменьшение модуля нормальной упругости E_1 на 10 % приводит к снижению частот колебаний на 5—7 %. Уменьшение υ_1 и υ_2 практически не влияет на собственные частоты при колебании по изгибным и крутильным формам. Частоты пластинчатых форм при уменьшении υ_1 увеличиваются на 3—5 %, при уменьшении υ_2 — уменьшаются на 3—5 %. Уменьшение плотности ВПКМ на 1 % приводит к незначительному увеличению частот. Снижение модуля сдвига в 2,2 раза приводит к уменьшению частот крутильных форм на 2—10 %. Наиболее существенное влияние на спектр собственных частот колебаний при изменении упругих характеристик ВПКМ оказывает изменение модуля E_1.

Большой выбор волокон и схем армирования позволяет эффективно изменять спектр частот и отстраиваться от резонансных колебаний. Начало усталостного разрушения устойчиво определяется по резкому уменьшению жесткости E_1 и резонансной частоты колебаний, резкому увеличению демпфирующей способности.

Высокие значения прочности и модуля упругости в сочетании с превосходной вибропрочностью обусловили применение высокомодульных ВПКМ для изготовления рабочих и направляющих лопаток вентиляторной ступени компрессора низкого давления. Высокая степень демпфирования углеволокнитов при крутильных и изгибных колебаниях обеспечивает значительное увеличение стойкости к флаттеру по сравнению с металлическими лопатками.

Применение высокомодульных ВПКМ в таких узлах авиационных двигателей, как корпуса компрессора и вентилятора, воздуховоды, диски статора и ротора компрессора низкого давления, подшипники и т. д. снижает массу маршевых двигателей на 15 % и двигателей вертикального взлета и посадки на 18 %. Опыт применения углеволокнитов в авиационных двигателях может быть использован в машиностроении при создании мощных компрессоров и турбин [4].

ВПКМ имеют высокую устойчивость к ползучести, а их теплопроводность существенно ниже (для углепластиков зависит от структуры армирования) теплопроводности металлов. Сравнительные свойства конструкционных материалов приведены в табл. 6.

С начала 50-х годов основным типом ВПКМ были высокопрочные, но низкомодульные (по сравнению с Al и Ti) стеклопластики, применяемые в производстве антенных обтекателей.

Использование ВПКМ в высоконагруженных конструкциях потребовало разработки материалов с более высоким модулем упругости с сохранением высокой прочности. Разработаны углеродные, борные, высокомодульные полимерные волокна (СВМ, Kevlar, Русар, из СВМПЭ) и угле-, боро-, органопластики многофункционального назначения.

Прочность кевларопластиков близка к прочности стеклопластиков, модуль упругости их примерно в 2 раза выше, но они плохо работают на сжатие и сдвиг, трудно обрабатываются. Борные волокна и боропластики дороги. В последнее время большое внимание привлекают SiC и некоторые другие волокна. Основными конструкционными ВПКМ становятся углепластики и гибридные ВПКМ.

Тенденции развития ВПКМ

Композиционные материалы (КМ) разработаны на основе матриц различной химической природы: полимерных (ПКМ), углеродных (УКМ), металлических (МКМ), керамических (ККМ). Комплекс эксплуатационных свойств ПКМ, УКМ, МКМ, ККМ определяется свойствами матриц, наполнителей и взаимодействием компонентов в гетерофазной структуре КМ.

К материалам первого поколения относятся изотропные материалы, которые могут быть однофазными (конструкционные металлические сплавы, объемная керамика, полимеры, модифицированные низкомолекулярными добавками, смеси термодинамически совместимых полимеров и др.) или гетерофазными (композиционными), представителями которых являются материалы, наполненные дисперсными частицами (порошки, короткие волокна) и сохраняющие изотропность свойств на микроуровне. Наполнение полимеров дисперсными частицами позволяет получать ПКМ с более высоким уровнем свойств (особенно при использовании волокон длиной в 10—100 раз большей критической длины волокна, когда реализуется механизм перераспределения напряжений с матрицы на упрочняющие волокна), а также получать ПМ со специальными свойствами (токопроводящие, электроактивные, магнитодиэлектрические, радиопоглощаю-

Таблица 6

Свойство	Стекловолокнит		Органоволокнит (СВМ, Kevlar)	Углеволокнит с углеродными волокнами		Бороволокнит, волокна B/W	Al	Ti	Сталь
	Стекло E	Стекло S		высокопрочными	высокомодульными				
Плотность, г/см^3	2,1	2,0	1,25—1,44	1,6	1,6	2,0	2,68—2,8	4,47—4,8	7,75—8,1
$E^+\|\|$, ГПа	45/32	55	76/32	145/88	220	210/135	62—73	105—125	186—215
$E^+\perp$, ГПа	12	16	5,5	10	6,9	19	62—76	105—125	186—215
Модуль сдвига G_{Ic}	5,2—5,5	7,6	2,0—2,1	4,8—5	4,8—5	4,8—6,2	—	—	—
Коэффициент Пуассона v^+	0,28	0,28	0,34	0,25	0,25	0,25	—	—	—
$\sigma^+\|\|$, МПа	1020/600	1620	1240/640	1240	760/460	1240/620	400	1000	1260
$\sigma^+\perp$, МПа	40	40	30	41	28	70	400	1000	1260
$\sigma^-\|\|$, МПа	620/300	690	280/104	1240	960/250	3300/600	400	1000	1260
$\sigma^-\perp$, МПа	140	140	140	170	170	280	400	1000	1260
$\tau_{сд}$, МПа	70 (до 100)	80 (до 100)	30—60	30—80 (до 100)	30—70	90	Высокая		
Относительное удлинение, %:									
$\varepsilon^+\|\|/\varepsilon^+\perp$	2,3/0,4	2,9/0,4	1,6/0,5	0,9/0,4	0,3/0,4	0,36/0,4	—	—	—
$\varepsilon^-\|\|/\varepsilon^-\perp$	1,4/1,1	1,3/1,1	2,0/2,5	0,9/1,6	0,3/2,8	0,6/1,5	—	—	—
Логарифмический декремент затухания колебаний θ, %	1,5/4,6		—/5	1,2/3,2		0,5/2,8	0,7	0,03 (ВТ-8)	0,06—0,07 (18ХНВА)
Усталостная прочность $\sigma_N\theta$, МПа	200/140		—/180	350/250		350/200	130	500	550
Вибропрочность σ_N, МПа	300/650		—/900	420/800		175/560	До 90	15	330
Термонагруженность $E^+\alpha 10^2$, ГПа/К	3,0		1,4	1,08		10,8	16,8	10	24
Трещиностойкость:									
$a_к$, КДж/м^2	10—580, 270 (СВАМ)		315	40—120 (КМУ-9)		85	До 400 (Д16Т-300)	—	450 (30ХГСА)
G_{Ic}, КДж/м^2	До 810		430—1130	До 210		—	—	—	—
Удельная прочность σ^+/ρ, км	70—100/50—60		140—180/80—120	70—100/40—60		60/30	14—16	27	16—24
							Металлы 4—53		
Удельный модуль упругости $E^+/\rho 10^3$, км	2,6—3,2/1,1—2		5,9—7,0/3,9—4,6	8—12/5,3—8,0		12,3	2,7—2,7	2,2—2,4	2,5—2,9
							Металлы 2,2—3,6		

Примечание. В знаменателе — данные для ортотропных (1 : 1) волокнитов.

щие и др.). Такое наполнение не позволяет реализовать главное преимущество ПКМ, наполненных непрерывными волокнами (ВПКМ, армированные ПКМ, Composite Materials), т. е. конструировать структуры высокопрочных и высокомодульных материалов с планируемой анизотропией свойств, что особенно важно для высоконагруженных изделий авиакосмической техники.

Совершенствование ПКМ первого поколения связано с использованием наукоемких технологий. Примерами таких материалов являются нанокомпозиты [6], где в качестве наполнителей использованы дисперсные наночастицы керамической (Al_2O_3, SiO_2, "наноглины") и углеродной (фуллерены, нанотрубки, основное применение которых связано с микро- и наноэлектроникой, молекулярной электроникой) природы.

Благодаря высоким значениям активной поверхности наночастиц композиции приобретают ценный комплекс эксплуатационных свойств даже при малом объеме наполнения. Другое направление — получение "молекулярных" композитов на основе жидкокристаллических полимеров, мезофазы которых формируют волокнистые структуры (принцип самоармирования, самоусиления). Механические свойства анизотропных молекулярных композитов аналогичны свойствам полимеров с

20—30 % дисперсных наполнений (например стеклянных волокон).

ВПКМ — материалы второго поколения, анизотропные гетерофазные композиции на основе непрерывных армирующих высокомодульных волокон в виде различных текстильных форм (нити, жгуты, ровинги, ленты, ткани). Стекло-, угле-, органопластики, поливолокнистые (гибридные) межслоевые и внутрислоевые ВПКМ широко применяют в различных областях техники, особенно в аэрокосмических конструкциях, ракетостроении, повышение эксплуатационных характеристик которых достигается и использованием специфических разновидностей ВПКМ (сотовые конструкции, многослойные супергибридные металло-полимерные, полимерно-керамические конструкционные типа Алоров и Сиалов и броневые, устойчивые к высокоскоростному инденторному воздействию, материалы). Структура ВПКМ при использовании современного расчетного аппарата для вязкоупругих тел может быть оптимизирована по отношению к характеру внешних воздействий и сконструирована с требуемым уровнем анизотропии свойств. ВПКМ, как правило, являются материалами многофункционального назначения, которые в зависимости от свойств компонентов могут сочетать конструкционные свойства с тепло- и термостойкостью, химической стойкостью, способностью экранировать ионизирующее излучение, радиопрозрачностью, радиоэкранированием, радиопоглощением.

Токопроводящие и магнитодиэлектрические ПКМ, наполненные углеродными компонентами, ферритами, аморфными металлами, являются узко- или широкодиапазонными радиопоглощающими материалами, используемыми для уменьшения радиолокационной заметности (УРЗ, технология Стелс).

Основными матрицами ПКМ являются составы на основе реактопластов (отвержденных эпоксидных, фенольных, эпоксифенальных, полимидных связующих). Их недостатки стимулировали переход к использованию составов на основе термопластов (термопластичные связующие на основе жесткоцепных полифениленоксинов, полифениленсульфидов, полиэфиркетонов, полисульфонов, полиэфиримидов), свойства которых позволяют более полно реализовать высокие упругопрочностные свойства волокон в композиции. Пленочная и волоконная технологии переработки термопластичных ПКМ в изделия существенно упрощает и удешевляет производство изделий из ВПКМ [2, 7].

При оптимизации структур ВПКМ им придается определенный уровень так называемой интеллектуальности, в части хотя и пассивной, но эффективной реакции материала на внешние воздействия (диссипация энергии при разрыве волокон, вязкоупругое поведение и гашение колебаний при вибрациях, остановка роста трещин стопперами и т. д.).

Направленная интеллектуализация материалов (переход к ПКМ третьего поколения) обеспечивает стабильность свойств конструкционных и специальных ПКМ за счет модификации их специальными компонентами и на основе использования достижений микро- и нанотехнологий, переводящих ПКМ в самодиагностирующиеся и адаптирующиеся к внешним воздействиям интеллектуальные полимерные композиционные материалы (ИПКМ) [8]. За счет введения в объем изделий из ПКМ, ВПКМ (конформно) датчиков (сенсоров, элементов микросенсорики), исполнительных компонентов и механизмов (актюаторов, элементов микромеханики), элементов систем связи, обработка информации и управления (оптические волокна, микропроцессоры, элементы микроэлектроники, микрооптоэлектроники) в ИПКМ реализуются возможности самодиагностики и адаптирования. Для создания датчиков, исполнительных механизмов и систем управления в ИМ используют различные материалы (токопроводящие, электроактивные, фоторефрактивные, люминесцирующие, пьезоэлектрические, фоторезисторные, механохимические, дендримерные, жидкокристаллические и другие полимеры и процессы).

Контролируемые процессы деструкции ВПКМ (фенольных, фенокремнийорганических углепластиков) лежат в основе технологии получения углеродных и углеродкерамических композиционных материалов (УКМ, УУКМ, УККМ), нашедших применение в качестве абляционных теплозащитных материалов (ГЧ БРДД, сопловые блоки РДТТ), многоразовых переизлучающих теплозащитных материалов (ТЗ ВКС), материалов для горячих трактов авиадвигателей пятого и шестого поколений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Михайлин Ю. А.* Требования к матрицам конструкционных ПКМ: Учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 1996. 70 с.
2. *Михайлин Ю. А.* Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. С.-Петербург: Профессия, 2006. 624 с.
3. *Трофимов Н. Н., Канович М. З.* Основы создания полимерных композитов. М.: Наука, 1999. 540 с.
4. *Алексашин В. М.* // Авиационная промышленность. 1997. № 6. С. 25—30.
5. *Мазутов Н. А.* НТС ВИМИ " Технология". Сер. Конструкции из КМ. 1989. Вып. 1. С. 33—41.
6. *Muelhaupt R.* // Kunststoffe. 2004. Vol. 94. № 8. S. 76—88.
7. *Армированные* пластики / Под ред. Г. С. Головкина. М.: МАИ, 1997. 402 с.
8. *Михайлин Ю. А.* Интеллектуальные материалы // ИБ "Полимерные материалы". 2004. № 8—10, № 12; 2005. № 1—3.

П. А. ГОЛОВКИН, канд. техн. наук
ОАО "Морской научно-исследовательский институт радиоэлектроники "Альтаир"

Повышение качества осесимметричных штампованных поковок из сплава АМг6 для герметичных сварных конструкций ответственного назначения

Штампованные поковки осесимметричных крышек люков космических аппаратов (группа контроля 1А ОСТ 92-1619—87) служат заготовками для получения чистовых деталей ответственного назначения, подвергающихся впоследствии сварке и работающих при высоком внутреннем давлении. Необходимость применения сварки, стойкость против криогенных температур и требование высокой герметичности обусловили наибольшее применение в качестве материала для их изготовления сплава АМг6. Рассматривали крышки люка двух типов: с ровным параболическим сечением (условно первый тип) и центральным торцем под сварку (условно второй тип).

При получении поковок крышек люков возникают такие технологические риски, как несоответствие зон качественной деформационной проработки металла поковки объему чистовой детали и неравномерный температурный режим в различных зонах поковки, часто приводящий к перегреву металла [1—3]. На рис. 1 на примере параболической крышки люка обозначены точки, в которых определяли параметры деформационного и температурного полей при формообразовании поковок.

Согласно ОСТ 92-1619—87, одним из основных, предъявляемых к поковкам данного типа требований является соответствие направления деформированных волокон профилю чистовой детали и обеспечение их перпендикулярности в зоне торцев чистовой детали плоскости сварного шва. Этим обеспечиваются наилучшие параметры чистовой детали и сварного соединения (прочность и герметичность материала крышки и сварного шва, уменьшение зоны термического влияния и т. д.) [4—6].

Во избежание развития межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания верхняя граница температурного интервала деформирования сплава АМг6 принята равной 380—400 °С [7—9]. Превышение этой температуры для подавления коррозионных явлений требует применения отжига при более высокой температуре, что приводит к полной потере деформационного упрочнения [7—9] (действующие стандарты предусматривают более широкий температурный интервал 300—450 °С).

Исходя из описанных предпосылок разработан альтернативный технологический процесс получения поковок методом открытой одноручьевой горячей объемной штамповки, обеспечивающий малую неравномерность деформации. Исследования проводили путем конечно-элементного моделирования с использованием прикладного программного продукта QForm и металлографического анализа структуры полученных по различным режимам поковок.

Базовый процесс получения поковок из прессованных прутков предусматривает осадку заготовок в торец, их отжиг и последующую штамповку в чистовом ручье. Скорость деформирования принимали равной 80 мм/с (скорость перемещения подвижной траверсы трехступенчатого гидравлического пресса с насосно-аккумуляторным приводом усилием 50 МН). Применяли водно-графитовую смазку АГ-3 (ТУ-6-08-392—77). Температура нагрева штампов перед работой 350 °С.

Процесс формообразования поковок состоит из трех основных этапов: касания верхней половиной штампа заготовки и начала ее осадки; интенсификации процесса осадки и развития процесса прямого выдавливания деформируемого металла заготовки; активного выдавливания материала заготовки вплоть до момента заполнения облойной канавки штампа.

На рис. 2 показано распределение температур на втором (вверху) и третьем (внизу) этапах формообразования поковок крышек первого и второго типов.

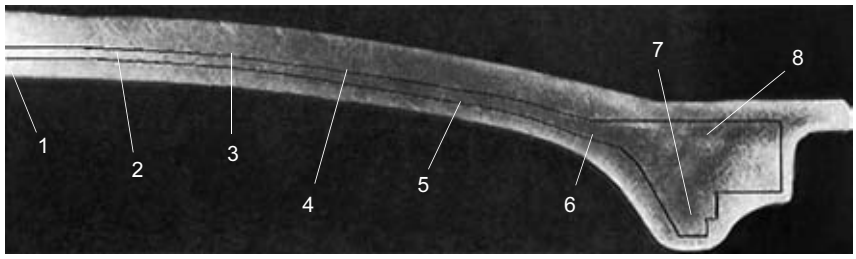
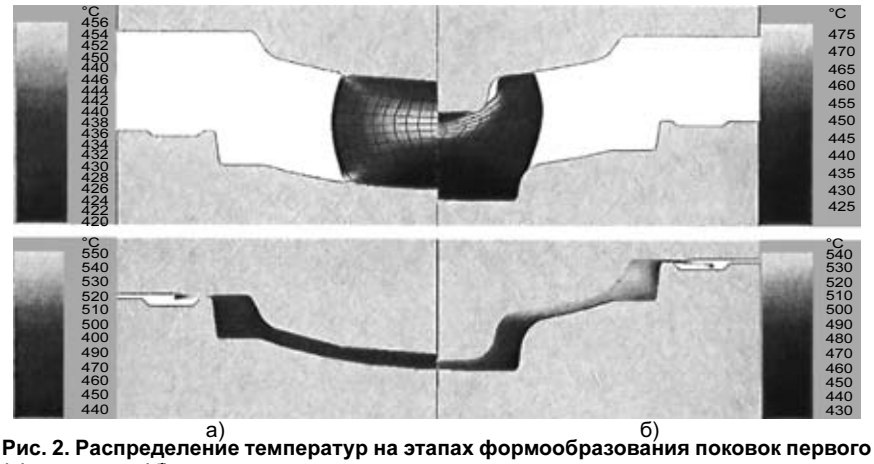


Рис. 1. Расположение чистовой детали и точек съема *1—8* параметров деформации по сечению поковки крышки люка



а) б)

Рис. 2. Распределение температур на этапах формообразования поковок первого (*а*) и второго (*б*) типов

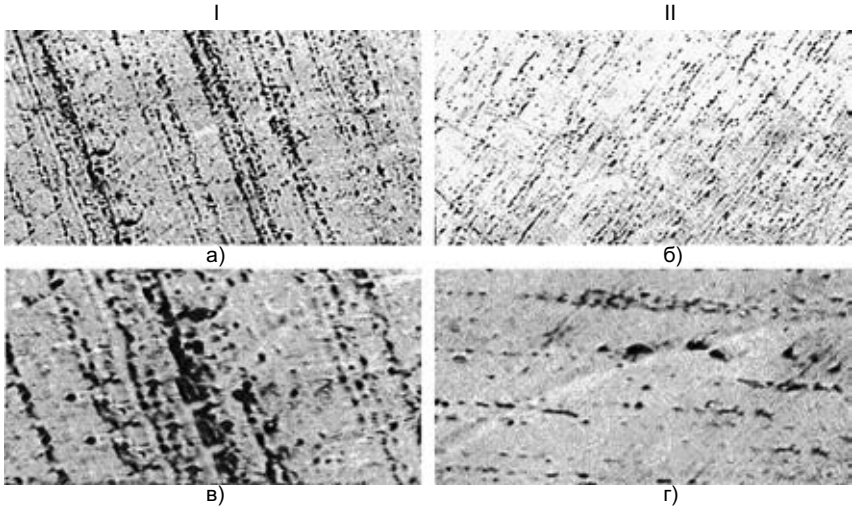


Рис. 3. Повышенное (*I*) и приемлемое (*II*) выделение β-фазы в сплаве АМг6 в зоне преобладания внутризеренной деформации при нагреве заготовок до 420 (*I*) и 320 (*II*) °С: *а*, *б* — ×200; *в*, *г* — ×400

Известно, что горячая пластическая деформация протекает с участием двух конкурирующих деформационных механизмов: внутризеренного (дефрагментационного) и межзеренного (рекристаллизационного) [7—9]. Последний обычно доминирует в зонах локализованной деформации, где велики сдвиговые деформации и деформационный разогрев. Поскольку межзеренная деформация энергетически менее затратна, чем внутризеренная, она носит нарастающий характер и дополнительно ухудшает равномерность протекания деформационных процессов, локализуя их.

Рост неравномерности деформации и обособление объемов, в которых деформация протекает с преобладанием межзеренного механизма, проявляются в тем большей мере, чем выше энергия металла, т. е. выше температура деформации, и чем значительнее силы трения и градиент температур на поверхности раздела поковка — инструмент.

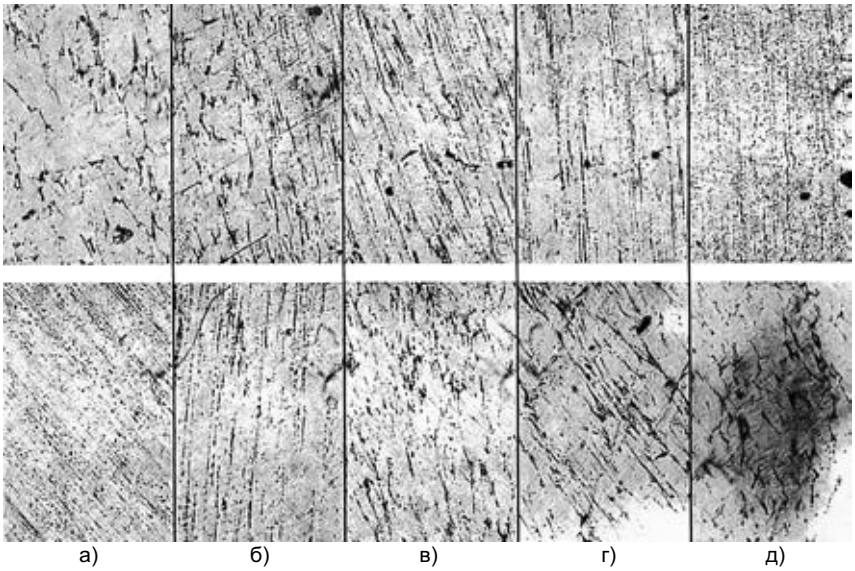
В результате в зонах локализованных сдвиговых деформаций ввиду высокой активности рекристаллизационных процессов образуются многочисленные протяженные межзеренные микронесплошности, частично заполненные крупными коагулянтами некогерентной с твердым раствором и более электроотрицательной интерметаллидной β-фазы Mg_2Al_3 (влияние соединений Mg_5Al_8, $FeAl_3$ и др. в связи их малым содержанием в работе не рассматривается) [1—3, 7—13]. Без рекристаллизационного отжига эти дефекты при эксплуатации изделия могут способствовать развитию межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением [4—6]. Однако проведение такого отжига полностью снимет деформационное упрочнение, следовательно, это неприемлемо.

Выделившихся интерметаллидов тем больше, чем выше температура деформации. Зависимость количества β-фазы Mg_2Al_3 в микроструктуре деформированного с преобладанием дефрагментационного механизма сплава АМг6 от температуры нагрева заготовки перед деформацией приведена на рис. 3.

Особо важна роль подавления коагуляции β-фазы для обеспечения качества сварных соединений. Поскольку температура плавления β-фазы составляет 2045 °С [10], а чистого алюминия — 672 °С, крупные коагулянты β-фазы не только препятствуют равномерному распределению электронных микроплотностей, но и образуют непрерывные тугоплавкие оторочки в зоне сплавления, вызывая появление горячих трещин в процессе кристаллизации и холодных — в процессе эксплуатации сварного шва.

Таким образом, межзеренный деформационный механизм носит негативный характер и его подавление является важной задачей. Характерно, что структура металла в зонах с преобладанием межзеренной деформации практически не отличается от недеформированной рекристаллизованной структуры (рис. 4).

Таким образом, деформация перестает быть средством получения направленной волокнистой структуры. Преобладание межзеренной деформации и повышенной температуры ее начала (420 °С) приводит к тому, что рек-



а) б) в) г) д)

Рис. 4. Структура деформированного сплава АМг6 при преобладании внутризеренного (вверху) и межзеренного (внизу) механизмов деформации: *а—д* — накопленная логарифмическая деформация равна 1,0—1,3, 1,3—1,8, 1,8—2,5, 2,5—3,7 и 3,7—4,3 соответственно

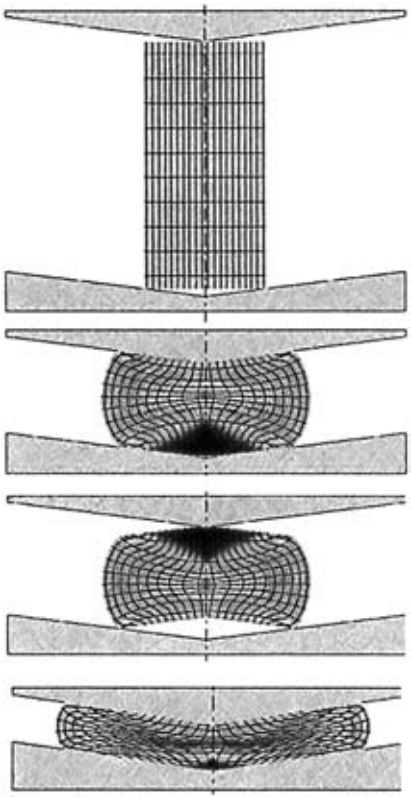


Рис. 5. Переходы осадки прутковой заготовки в конических бойках

ристаллизованная структура и выделение крупных коагулянтов β-фазы (см. рис. 4, внизу) не позволяют получать качественные герметичные сварные узлы [1—7, 10].

Подавление локализации сдвиговых деформаций и понижение температуры начала деформации до 320 °С (уменьшение градиента температур на поверхности раздела поковка — инструмент) в случае преобладания внутризеренного механизма деформации позволяют получать свободную от перечисленных недостатков структуру поковки [1—3, 11, 12] (см. рис. 4, вверху). Это связано с тем, что повышение равномерности деформации через равномерное распределение избыточной энергии деформируемого металла ограничивает образование β-фаз и их локализацию по границам зерен.

Ограниченное выделение β-фазы повышает растворно-осадительное упрочнение материала поковки, а достигаемая мелкая дисперсность структуры не только повышает механические и коррозионные свойства [4—7], но и способствует равномерному распределению плотностей сварочного тока и отводу теплоты при сварке чистовых деталей [4—7].

С целью минимизации сдвиговых деформаций увеличивали размер исходной заготовки в плане путем увеличения степени ее осадки. Достигаемое при этом подавление межзеренной деформации в процессе штамповки вместе с уменьшением градиента температур на поверхности раздела поковка—инструмент является эффективным способом улучшения качества деформированной структуры [1—3]. Хорошие результаты достигаются при использовании многопереходной осадки в вогнуто-выпуклых бойках конусностью 6—7° с единичной степенью деформации заготовки $\varepsilon = 30 \div 35$ % и попереходной кантовкой [14]. Кантовкой достигается перемещение очага деформации по объему осаживаемой заготовки (рис. 5), как следствие — увеличение объема поковки (рис. 6), проработанного с преобладанием внутризеренной деформации.

Как следует из представленных на рис. 6 диаграмм, перемещение очага деформации позволяет сократить разброс логарифмических значений накопленной деформации с 3,0/0,2 до 2,4/0,6, т. е. с 15 до 4 раз.

Параметры штамповки рассчитывали исходя из предпосылки, что облойная канавка штампа

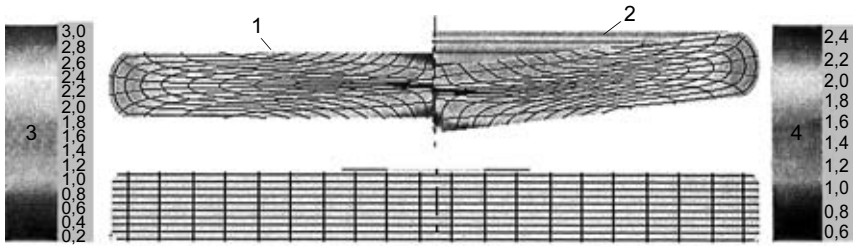


Рис. 6. Распределение накопленной деформации по сечению поковок, осаженных на 85 % в плоских *1* и конических *2* бойках в линиях Лагранжа *3* и логарифмических единицах *4* (внизу показана горячекатаная заготовка)

заполняется практически полностью (70 %), а не на 30 %, как принимают обычно. Это связано с тем, что гидравлические прессы обычно не имеют жесткой регулировки рабочего хода, а потому объяснимо стремление машиниста пресса во избежание дополнительного рабочего хода как можно более деформировать заготовку. Такое превышение необходимой деформации приводит к дополнительному деформационному разогреву материала поковки на 20—40 °С.

Однако, как следует из рис. 6, любой способ осадки не обеспечивает такой равномерности деформированной структуры, какой характеризуется вырезанная из горячекатаной плиты цилиндрическая заготовка. Получение поковок из таких заготовок обладает тем достоинством, что исходная отожженная структура горячекатаной плиты близка к изотропной. В результате деформация заготовки в штампе протекает наиболее равномерно, обеспечивая получение качественной структуры поковки (рис. 7). Наряду с квазиизотропной структурой заготовки такая равномерность деформации объясняется малым значением сдвиговых деформаций вследствие приближения формы и размеров в плане заготовки к форме и размерам в плане штампового ручья (рис. 8).

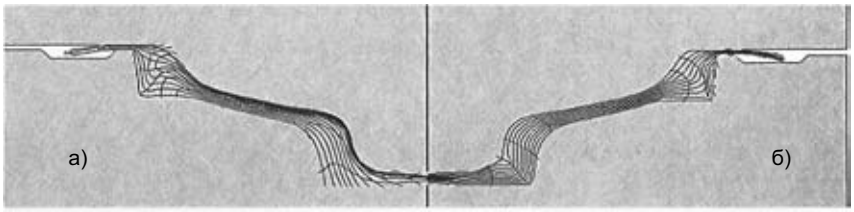


Рис. 7. Распределение накопленных деформаций в линиях Лагранжа по сечению поковок второго типа, полученных из прутка (*а*) и плиты (*б*)

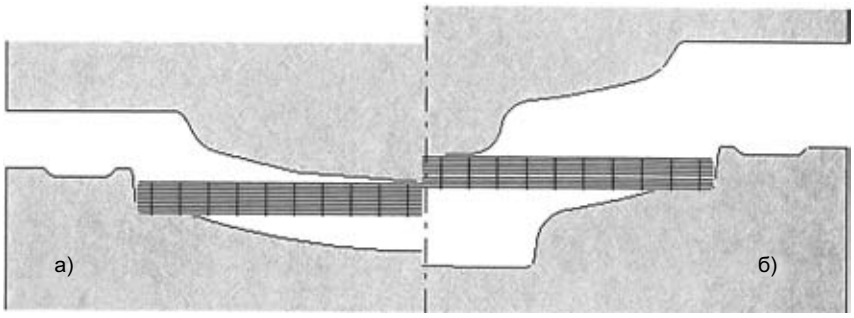


Рис. 8. Заготовки из горячекатаных плит в штампах первого (*а*) и второго (*б*) типов

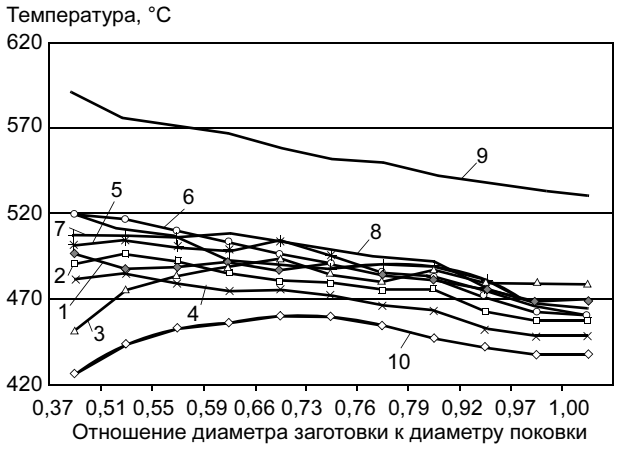


Рис. 9. Зависимость температуры в контрольных точках *1—8* от отношения диаметра исходной заготовки к диаметру штампового ручья первого типа (*9, 10* — максимальная и минимальная температура)

При этом формообразование поковки происходит по комбинированной схеме вытяжки и обратного выдавливания. В отличие от традиционной схемы формообразования (см. рис. 2) такая схема обеспечивает перемещение очагов деформации по мере формообразования поковки. Это по аналогии с осадкой с кантовкой прутковой заготовки в конических бойках препятствует локализации сдвиговых деформаций и доминированию межзеренного механизма деформации.

Как результат математического моделирования процессов формообразования поковок первого и второго типов на рис. 9—11 приведены зависимости накопленных деформаций и температур по их сечениям.

Зависимость накопленных материалом поковки деформаций от типа используемой заготовки (см. рис. 9) такова, что с утонением заготовки вследствие увеличения эффекта вытяжки при штамповке разброс значений накопленных деформаций уменьшается (повышаются их минимальные значения и понижаются максимальные).

В зависимости от вида и формы используемых заготовок ввиду деформационного разогрева температура в точках 6 и 8 поковки может достигать 470—520 °С. Более того, в зоне облойного мостика температура может достигать 530—600 °С. В то же время температурный интервал рекристаллизации сплава АМг6 (при скорости нагрева 10 °С/с) составляет 310—330 °С [15], а температура солидуса — 490 °С [16]. Использование эффекта вытяжки

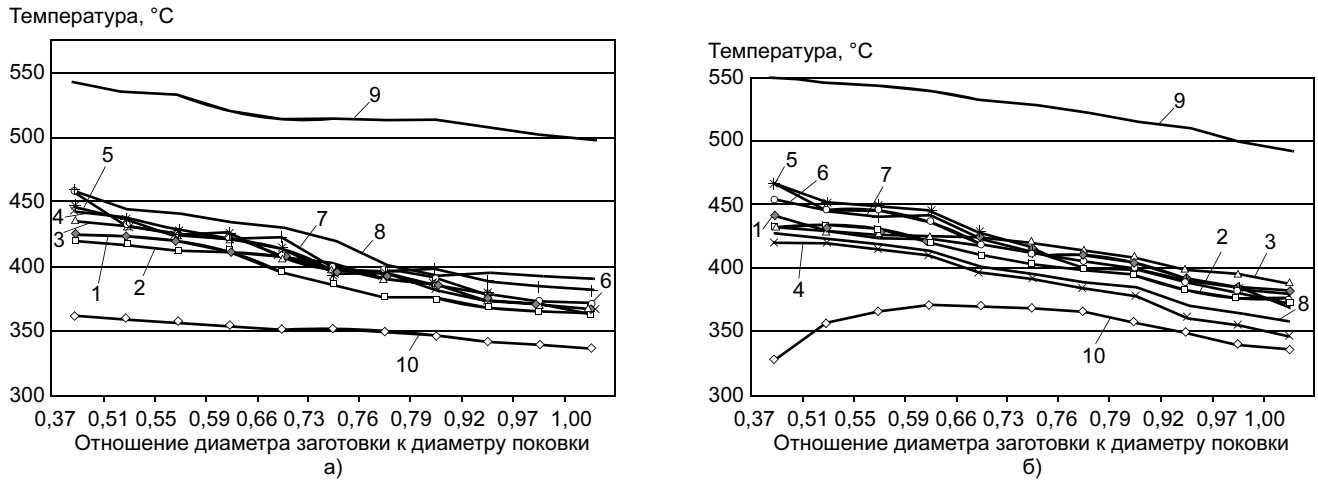


Рис. 10. Зависимость температуры в контрольных точках *1—8* от отношения диаметра заготовки к диаметру поковки крышки люка первого (*а*) и второго (*б*) типов (обозначения — см. рис. 9)

позволяет уменьшить разброс температур в контрольных точках с 50 до 25 °С и снизить их максимальное значение до 480 °С. Однако и эта температура является чрезмерной (см. рис. 3), и необходимо принимать меры к понижению температуры материала поковки. Наряду с использованием эффекта вытяжки заготовки при штамповке этого можно достигнуть снижением температуры разогрева металла перед деформацией.

На рис. 10, 11 приведено распределение накопленных деформаций и температур по сечению поковки первого и второго типов в зависимости от численного отношения диаметра горячекатаной заготовки к диаметру штампового ручья. Температура нагрева заготовок перед деформацией 320 °С.

Снижение температуры нагрева металла перед деформацией уменьшает разброс температур в контрольных точках с 50 до 20 °С и снижает их максимальное значение до 380 °С, качественно подавляя рекристаллизационные процессы и ограничивая коагуляцию в межзеренных микропустотах интерметаллидов β-фазы.

Результаты моделирования показали, что формообразование поковок с эффектом вытяжки позволяет уменьшить величину штамповочных припусков и напусков (ОСТ 92-1619—87), что не только уменьшает расход металла и объем механической обработки, но и дополнительно повышает равномерность проработки металла поковки [1, 2]. В результате на 30—40 % повышается КИМ и улучшается качество поковок.

Измерение микротвердости и анализ металлографии поковок в различных точках показали, что деформация при пони-

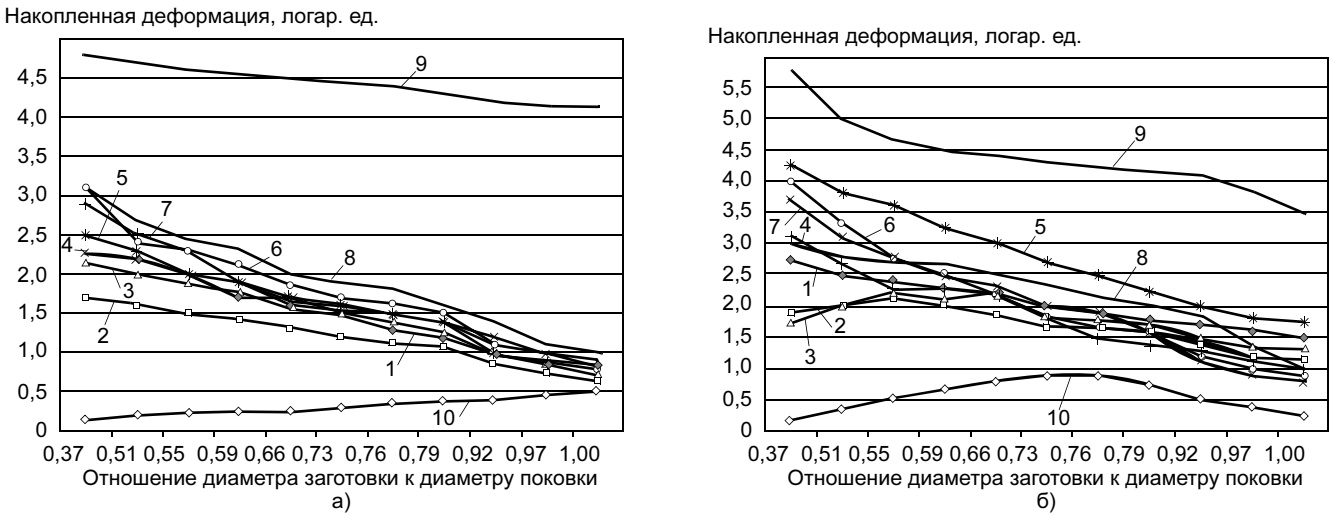


Рис. 11. Зависимость накопленной деформации от отношения диаметра заготовки к диаметру поковки крышки люка первого (*а*) и второго (*б*) типов (обозначения — см. рис. 9)

женной температуре и использование заготовок из горячекатаных плит путем повышения однородности деформации и подавления рекристаллизационных явлений позволяют получить структуру поковок, отвечающую предъявляемым требованиям к деталям ответственного назначения.

Для количественного определения взаимосвязи деформационной схемы и свойств материала поковок измеряли его микротвердость на примере поковок первого типа, полученных из осаженных в плоских бойках и горячекатаных заготовок.

Для поковки, полученной из осаженной за два перехода на 80 % в плоских бойках заготовки, разброс значений микротвердости составил 27 %, достигая в максимуме 144 ед. Для полученной из горячекатаной заготовки поковки аналогичные показатели составили 25 % и 150 ед. соответственно, т. е., максимальное значение микротвердости, полученной по предлагаемой технологии поковки, больше на 4 % (6 ед.), минимальное значение — больше на 9 % (11 ед.), что свидетельствует о более равномерной и плотной структуре поковки.

ВЫВОДЫ

1. В качестве заготовок под штамповку рассматриваемых поковок целесообразно использовать заготовки из горячекатаных плит, близкие по форме и размерам в плане к форме и размерам в плане штамповочного ручья. Это снижает неравномерность процесса деформации и уменьшает накопленные сдвиговые деформации по сравнению с вариантом осадки перед штамповкой прутковых заготовок в конических бойках.

2. Дополнительно повысить равномерность деформационной проработки и подавить развитие динамической рекристаллизации в зонах преобладания межзеренного деформационного механизма позволяет снижение температуры начала деформации до 320 °С. Получаемая структура поковок характеризуется равномерной мелкозернистостью, отсутствием крупных коагулянтов интерметаллидов, как следствие — повышенной прочностью и пластичностью, стойкостью против развития межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением.

3. Изготовление поковок с использованием горячекатаных плит позволяет не только улучшить их качество, но и оперативно реагировать на такие производственные факторы, как наличие или отсутствие того или иного вида полуфабрикатов, загрузка имеющегося оборудования, и т. д. Технологический процесс включает получение цилиндрических заготовок из горячекатаных плит (диаметр заготовки определяется равенством диаметру большего торца поковки), нагрев заготовок до 320 °С и открытую чистовую штамповку.

Предлагаемый способ управления деформацией при штамповке может распространяться на широкую номенклатуру поковок и не требует дополнительных затрат на изготовление специальной оснастки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галкин В. И., Головкин П. А.* Повышение качества штампованных поковок типа фланец из алюминиево-магниевых сплавов с использованием одноручьевой штамповки в открытых и закрытых штампах // Цветные металлы. 2003. № 5. С. 60—65.
2. *Галкин В. И., Головкин П. А.* Получение качественных переходников топливных систем из алюминиево-магниевых сплавов с использованием одноручьевой штамповки в открытых штампах // Технология легких сплавов. 2003. № 2—3. С. 46—51.
3. *Головкин П. А.* Управление деформированной структурой алюминиево-магниевых сплавов // Технология металлов. 2005. № 11. С. 10—16.
4. *Алов А. А., Самарина М. В., Шевченко Б. С.* Структура зон взаимной кристаллизации сварных соединений из алюминиевых сплавов // Алюминиевые сплавы. Вып. 7. Коррозионностойкие конструкционные сплавы. М.: ВИЛС, 1975. С. 106—111.
5. *Прохоров Н. Н.* Технологическая прочность сварных швов в процессе кристаллизации. М.: Металлургия, 1979. 248 с.
6. *Рязанцев В. И., Федосеев В. А.* Проблемы дуговой сварки алюминиевых сплавов // Авиационная технология. 1990. № 1. С. 30—37.
7. *Амбарцумян С. М., Кондратьева Н. Б.* Коррозионная стойкость свариваемых алюминиевых сплавов системы Al—Mg // Тр. ВИАМ. Алюминиевые сплавы. Вып. 6. Свариваемые сплавы. М.: Металлургия, 1969. С. 27—36.
8. *Мурзов А. И., Позднеев В. Г.* Механизм и условия образования несплошностей при пластическом формоизменении алюминиевых сплавов // Тр. ВИАМ. Алюминиевые сплавы и специальные сплавы. М.: ОНТИ, 1970. Вып. 5. С. 86—102.
9. *О некоторых* закономерностях развития пластической деформации при горячей деформации высоких заготовок / Ю. Н. Куренков, Г. Г. Москвичев, А. В. Федорова, А. В. Смаковская // Тр. ВИАМ. Алюминиевые сплавы и специальные материалы. М.: ОНТИ, 1975. Вып. 9. С. 95—105.
10. *Синявский В. С., Истомин В. В., Уланова В. В.* Исследование термомеханической обработки сплавов системы Al—Mg с целью повышения их коррозионной стойкости // Тр. ВИАМ. Алюминиевые сплавы. Вып. 7. Коррозионно-стойкие конструкционные сплавы. М.: ОНТИ, 1975. С. 93—103.
11. *Головкин П. А.* Влияние коррозионных характеристик горячедеформированной структуры на технологичность сплавов АМг6 и 01570 // Коррозия: материалы, защита. 2005. № 12. С. 3—5.
12. *Головкин П. А.* Влияние режимов горячей деформации на коррозионные свойства сплавов АМг3 и АМг6 // Коррозия: материалы, защита. 2005. № 7. С. 2—5.
13. *Бокштейн Б. С.* О диффузионной ширине большеугловой границы зерна // Процессы диффузии, дефекты структуры и свойства металлов / Под. ред. А. Т. Туманова. М.: Металлургия, 1972. 222 с.
14. *Головкин П. А.* Повышение качества оребренных штампованных поковок из алюминиево-магниевых сплавов // Технология машиностроения. 2006. № 7. С. 11—17.
15. *Исследование* влияния параметров термообработки на структуру листовых полуфабрикатов из сплава АМг6 / В. Н. Самонин, Н. Г. Куренкова, В. В. Пашенцев и др. // Технология легких сплавов. 1991. № 7. С. 52—55.
16. *Диаграммы* состояния систем на основе алюминия и магния: Справочник. М.: Наука, 1977. 228 с.

В. А. РОГОВ, д-р техн. наук, О. В. РОХИН, аспирант
Российский университет дружбы народов

Автоматизированное управление режимами резания при фрезеровании поверхностей крупногабаритных фасонных заготовок гребных винтов

В современном машиностроении используют большое количество фасонных деталей, которые имеют поверхности сложной формы или сочетания таких поверхностей. Это воздушные винты, лопатки турбин и компрессоров, гребные винты, кулачки, эксцентрики, распределительные валы и др. Обработка таких деталей весьма сложна, поскольку имеет место неравномерный припуск, необходимо специальное оборудование, сложно выдержать постоянные углы резания, технический контроль требует наличия специальных измерительных инструментов и приспособлений. В большинстве случаев обработку заготовок таких деталей осуществляют по упорам, конечным выключателям с использованием большого количества шаблонов, лекал и т. д. Многие операции окончательной обработки осуществляют вручную.

Развитие вычислительной техники, станков с ЧПУ и обрабатывающих центров позволило полностью автоматизировать процесс обработки и технического контроля.

Одним из примеров фасонных деталей является судовой гребной винт. Обработка такой детали усложняется тем, что она имеет большие габаритные размеры (несколько метров в диаметре), жесткость лопасти у ступицы в несколько раз выше, чем на периферии, лопасти под действием собственного веса прогибаются, а под действием сил резания вибрируют. Перед началом механической обработки необходимо определить, возможно ли вообще изготовление винта из имеющейся отливки.

Основные принципы автоматизированного процесса подготовки производства гребного винта были сформулированы в середине 70-х годов двадцатого столетия. В 80-е годы исследователи работали над автоматизацией математического представления поверхностей гребного винта и автоматизацией программирования процессов обработки гребных винтов на станках с ЧПУ. Однако решение оптимизационных задач по минимизации полного станочного времени было связано с большими трудностями. Одной из основных причин этого является отсутствие фактической величины припуска и глубины резания, так как операции первичной разметки заготовки и "вписывания" в нее детали выполнялись примерно.

В настоящее время при решении задач по фрезерованию фасонных деталей используют CAD/CAM высшего уровня для многокоординатных специализированных станков, а в операциях контроля геометрии сложных поверхностей все больше применяют информационный массив "облако точек", получаемый за счет применения автоматизированной координатно-измерительной машины (КИМ). Это позволяет создать виртуальные геометрические модели, размерные параметры первой модели могут быть заданы конструктором детали, а второй — определяются сканированием поверхностей физического объекта с помощью КИМ. Сравнение геометрии этих двух моделей позволяет выявить размерные отклонения, а с позиций процесса обработки сравнение позволяет заново подойти к решению задачи оптимального "вписывания" в заготовку, предсказать припуск и глубину фрезерования при обработке фасонных деталей со сложной поверхностью. Кроме этого становится возможной реализация адаптивного фрезерования, когда изменение глубины резания сопровождается изменением подачи и скорости инструмента с целью минимизации станочного времени. Для реализации такого подхода остается решить следующие задачи:

— разработать методику создания конструкторской модели на основе современного развития САПР;

— разработать методику автоматизированного рационального распределения припусков заготовки и управления глубиной резания за счет оптимального "вписывания" конструкторской модели в оцифрованную измеряемую модель заготовки на базе средств автоматизированной КИМ и алгоритмов программного обеспечения для контроля форм и размеров;

— разработать теоретические положения и методику корректировки режимов резания (подачи и скорости инструмента) в зависимости от изменения глубины резания при неравномерном припуске по критерию стабилизации силы резания и стойкости инструмента.

Для создания конструкторской модели выбрали CAD/CAM Unigraphics. Методика создания геометрической модели гребных винтов основана на представлении винта в виде ассоциативной сборки семейства цилиндрических сечений, что позволяет редактировать параметры сечений винта в элек-

тронной таблице Excel файла-шаблона этого семейства, заранее разработанного для серии винтов, геометрию сечений которых задают одинаковым числом точек. Файл-шаблон семейства содержит следующие параметры: *R* — радиус сечения; *H* — шаг сечения; *B* — ширина сечения; *B2* — абсцисса максимальной толщины сечения; *X* — абсцисса выхода сечения; *Z* — число лопастей; *T* — расстояние вдоль оси винта от оси лопасти до торца ступицы с нагнетательной стороны; *N* — расстояние вдоль оси винта от оси лопасти до начала собственной системы координат сечения; *E1*_025...*E1*_05 — ординаты точек сечения с нагнетательной стороны; *E2*_025...*E2*_05 — ординаты точек сечения с засасывающей стороны; *R0* — дополнительное корневое сечение; *R1*, *R2*, ..., *RN* — имена файлов (*.prt) семейства сечений.

Все параметры связаны с геометрией файла-шаблона и, следовательно, геометрией семейства сечений. Элементами этой геометрии являются цилиндр с радиусом сечения *R*; эскиз развернутого плоского параметризированного сечения в плоскости, касательной к цилиндру, повернутый на шаговый угол вокруг оси лопасти и смещенный на величину *N* вдоль оси винта; навернутые на цилиндр сплайны плоского сечения (диаметральные сечения).

В головной файл сборки модели винта добавляют только диаметральные сечения, что позволяет не загромождать его всеми элементами, присутствующими в файлах семейства.

Использование модуля Wave создания ассоциативных связей между файлами позволяет построить поверхности пера лопасти на базе сплайнов диаметральных сечений, сшить и связать их со ступицей. В последнюю очередь строится галтель.

Методика автоматизированного распределения припусков заготовки (рис. 1) основана на алгоритме оптимального "вписывания" конструкторской модели в оцифрованную измеряемую полигональную модель заготовки.

Целевую функцию алгоритма, реализуемую в среде программы Imageware, которая специализируется на создании цифровых моделей для автомобильных поверхностей класса А, можно представить в виде $\Delta max - \Delta min \rightarrow min$ (Δmax, Δmin — максимальное и минимальное расстояние между облаками точек конструкторской и измеряемой моделей соответственно). Программа в итерационном автоматизированном режиме рассчитывает перемещение облака точек конструкторской модели относительно облака точек измеряемой модели для выполнения целевой функции. Перемещение облака точек конструкторской модели происходит вместе с самой моделью, поэтому результат расчета — вписывание конструкторской модели в облако точек измеряемой полигональной модели, для которого характерно усредненное расстояние между облаком точек измеряемой и конструкторской моделей. Следовательно, припуск заготовки также равномерно распределяется.

Для оценки величин припуска и результата базирования конструкторской модели в системе координат, при котором произведено сканирование, используют цветные диаграммы расстояний между облаком точек измеряемой модели и поверхностями конструкторской модели. При необходимости выполняют дополнительное базирование с последующей оценкой величин припуска. После этого определяют координаты точек, задающих базы.

Чтобы получить значения припуска в точках управляющей программы, а не только в точках сканирования, программа выполняет расчет расстояний между точками управляющей программы и поверхностью полигональной измеряемой модели, которая создается в автоматическом режиме по облаку сканированных точек. Величина припуска является исходной величиной для определения глубины резания и числа проходов. В свою очередь, величина глубины резания в кадре управляющей программы является сигналом для корректировки подачи по критерию постоянства силы резания на всей траектории фрезерования, что позволяет рационально подойти к ис-

Рис. 1. Этапы автоматизированного распределения припусков заготовки и ее первичной разметки

Обрабатываемый материал	Параметр					
	k_{Mv}	k_{Mp}	x_v	y_v	x_p	y_p
08Х14НДЛ	0,7	0,9	0,31	0,32	0,92	0,75
08Х15Н4ДМЛ	0,7	1	0,2	0,35	0,92	0,78
БрА9Ж4Н4	0,85	0,75	0,17	0,1	0,9	0,75
25Л	0,7	0,7	0,1	0,4	0,9	0,7

пользованию мощности станка и машинного времени.

Однако известно, что наибольшее влияние на температуру резания θ оказывает скорость резания v, затем подача s и наименьшее — глубина резания t. В таком же порядке v, s и t влияют на период стойкости инструмента T. Тогда рост подачи, сопровождающийся уменьшением глубины фрезерования, не будет компенсировать полностью рост температуры резания, а следовательно, уменьшения периода стойкости инструмента. Поэтому предложено использовать корректировку скорости резания по критерию сохранения стойкости инструмента.

Определим аналитические закономерности корректировки подачи и скорости в зависимости от глубины фрезерования. Средняя окружная сила резания при торцевом фрезеровании

$$P_z = 10 C_p s_z^{y_p} t^{x_p} B^n z K_{Mp} / D^q n^w, \qquad (1)$$

где коэффициенты и показатели степеней C_p, y_p, и x_p, K_{Mp} зависят главным образом от рода обрабатываемого материала и его механических свойств в соответствии с таблицей; B — ширина фрезерования, мм; t — глубина резания, мм; s_z — подача на зуб, мм/зуб; z — число зубьев фрезы; n — частота вращения фрезы, об/мин; D — диаметр фрезы, мм.

По критерию постоянства сил резания справедливо уравнение

$$10 C_p s_z^{y_p} t^{x_p} B^n z K_{Mp} / D^q n^w =$$

$$= 10 C_p (s_z + ds_z)^{y_p} (t - dt)^{x_p} B^n z K_{Mp} / D^q n^w n^w. \qquad (2)$$

Выполнив преобразования, получим

$$\left(\frac{t - dt}{t}\right)^{-x_p} = \left(\frac{s_z + ds_z}{s_z}\right)^{y_p}. \qquad (3)$$

Значение $\zeta = \dfrac{s_z + ds_z}{s_z}$ — относительная подача на зуб, а $\tau = \dfrac{t - dt}{t}$ — относительная глубина резания, поэтому зависимость относительной подачи от относительной глубины резания принимает вид

$$\zeta = \tau^{-x_p / y_p}. \qquad (4)$$

Используя рекомендации типового технологического процесса, находят минимальную подачу $s_{z\,\min}$, которой соответствует максимальное значение глубины фрезерования.

Тогда по формуле

$$s_z = \zeta s_{z\,\min} \qquad (5)$$

можно определить значение подачи на зуб в любом кадре управляющей программы в зависимости от относительной подачи на зуб.

Подставив выражение (4) в формулу (5), получаем значение s_z от относительной глубины резания:

$$s_z = \tau^{-x_p / y_p} s_{z\,\min}. \qquad (6)$$

На рис. 2 приведена зависимость подачи s_z от глубины резания t.

Для кривых $s_z(t)$ характерно гиперболическое возрастание подачи при уменьшении глубины фрезерования. В рекомендуемом диапазоне подачи на зуб от 0,8 до 0,15 мм кривые разных материалов имеют незначительные отличия. Однако при больших подачах наиболее чувствительными к изменению глубины являются стали 25Л и 08Х14НДЛ. Менее чувствительны бронза БрА9Ж4Н4 и сталь 08Х15Н4ДМЛ. Причиной этого является значение отношения степенных показателей x_p / y_p, составляющее для стали 08Х15Н4ДМЛ — 1,18; бронзы БрА9Ж4Н4 — 1,2; 08Х14НДЛ — 1,23; 25Л — 1,28.

Определим аналитическую закономерность, связывающую изменение скорости с изменением глубины резания по критерию сохранения заданной стойкости фрезы.

Максимальная скорость резания, соответствующая максимальной глубине резания и минимальной подаче

$$v_{\max} = C_v D^q K_{Mv} / T^m t_{\max}^{x_v} s_{z\min}^{y_v} B^u z^p. \qquad (7)$$

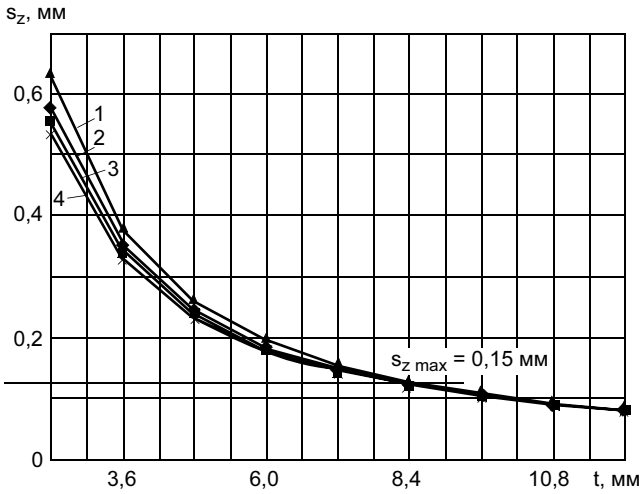


Рис. 2. Зависимость подачи на зуб от глубины резания: *1*, *2*, *4* — стали 25Л, 08Х15Н4ДМЛ, 08Х14НДЛ соответственно; *3* — бронза БрА9Ж4Н4

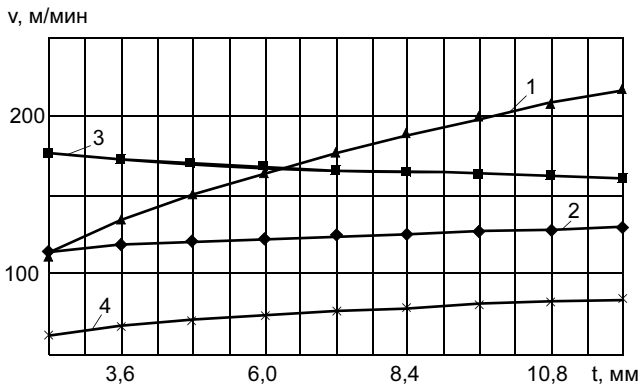


Рис. 3. Зависимость скорости резания от глубины резания (*1—4* — обозначения — см. рис. 2)

С учетом изменения глубины и подачи вдоль траектории движения инструмента скорость резания определяется выражением

$$\upsilon = C_\upsilon D^q K_\upsilon / T^m (t_{\max}\tau)^{x_\upsilon} (s_{z\min}\zeta)^{y_\upsilon} B^u z^p \qquad (8)$$

или

$$\upsilon = \upsilon_{\max}\upsilon, \qquad (9)$$

где υ — относительная скорость резания.

Приравняв выражения (8) и (9) и подставив выражение (7) вместо $\upsilon_{\max}$, получим

$$\upsilon = 1/\tau^{x_\upsilon}\zeta^{y_\upsilon}. \qquad (10)$$

Тогда с учетом зависимости (9) зависимость скорости от глубины и подачи резания принимает вид

$$\upsilon = \upsilon_{\max}/\tau^{x_\upsilon}\zeta^{y_\upsilon}. \qquad (11)$$

Подставив выражение (4) в (11), получим зависимость скорости от глубины резания при переменной подаче:

$$\upsilon = \upsilon_{\max}\tau^{(y_\upsilon x_p / y_p - x_\upsilon)}. \qquad (12)$$

На рис. 3 приведена зависимость скорости резания υ при переменной подаче от глубины резания t, построенная по функции (12), для торцевого фрезерования материалов, используемых для изготовления гребных винтов. Кривые $\upsilon(t)$ для сталей 08Х14НДЛ, 08Х15Н4ДМЛ и 25Л демонстрируют уменьшение скорости при уменьшении глубины, которое сопровождается ростом подачи. Наибольшая зависимость скорости резания от величины подачи и глубины характерна для стали 25Л. Показатель степени в формуле (12) $y_\upsilon x_p / y_p - x_\upsilon$: для 25Л — 0,414; 08Х14НДЛ — 0,082; 08Х15Н4ДМЛ — 0,213. Для бронзы БрА9Ж4Н4 показатель степени имеет отрицательное значение — 0,05, поэтому кривая зависимости скорости от глубины показывает, что с уменьшением глубины скорость фрезерования, как и подача, возрастает.

По формулам (6), (12) подпрограмма постпроцессора станка рассчитывает значения скорости и подачи инструмента в каждом кадре управляющей программы в зависимости от глубины резания в соответствующем кадре.

Реализация изложенного подхода позволяет повысить эффективность фрезерования за счет увеличения объема снятого металла в единицу времени. Методика автоматизированного рационального распределения припусков заготовки и определения глубины резания за счет оптимального "вписывания" конструкторской модели в оцифрованную измеряемую модель заготовки позволяет исключить субъективный фактор операции первичной разметки заготовки гребного винта и повысить точность изготовления на 1,5 % от местной толщины сечения лопасти. Методика создания конструкторской теоретической модели винта позволяет существенно увеличить эффективность использования CAD/CAM при имитации технологического процесса, выпуске управляющих программ и рабочей конструкторско-технологической документации за счет сокращения времени на 40—50 %.

В. К. СТАРКОВ, д-р техн. наук, С. А. РЯБЦЕВ, канд. техн. наук (МГТУ "Станкин"),
С. В. КОСТРОВ, инж. (ОАО "Волжский абразивный завод")

Опыт шлифования зубчатых колес высокопористыми абразивными кругами

В данной работе приведены результаты исследований, производственных испытаний и внедрения технологий глубинного и маятникового шлифования зубчатых колес и шлицевых соединений с применением высокопористых абразивных кругов.

Производственные испытания и освоение новой технологии изготовления зубчатых колес и соединений различных типоразмеров и с различными требованиями по точности и качеству обработки проводили на предприятиях авиационной и станко-

строительной промышленности, заводах агрегатостроения, ремонтном производстве и др.

Данная технология включает комплексную обработку шлифованием поверхности зубчатого профиля (предварительное формообразование и чистовое шлифование различными методами), а также предварительное и чистовое шлифование наружных и внутренних цилиндрических и плоских поверхностей зубчатых колес. Предварительное формообразование зубьев производится методами профильного глубинного и врезного шлифования по целому (аналог схемы глубинного шлифования), т. е. без предварительной обработки лезвийным инструментом на зубошлифовальных станках различных типов с периодическим или непрерывным делением. Чистовое шлифование зубьев после химико-термической обработки производится методами профильного или обкатного шлифования.

Профильное шлифование цилиндрических зубчатых колес наружного и внутреннего зацепления с модулем $m \leqslant 10$ мм, числом зубьев $z \leqslant 122$ и шириной венца $b \leqslant 105$ мм из сталей 16Х3НВФМБ-Ш, 20Х2НМА, 30Х2Н2ВФМА и др. выполняют на профилешлифовальном станке P600G фирмы Gleason-Pfauter (США—Германия). Шлифование зубьев производят либо по целому на заготовках после объемной закалки до твердости 31—40,5 HRC, либо после химико-термической обработки поверхности зубьев с твердостью до 60—62 HRC. В качестве режущего инструмента используют высокопористые круги прямого профиля наружным диаметром от 80 до 350 мм и высотой от 10 до 32 мм с характеристиками 25А 10—25П ВМ2—М2 12—16К.

Цилиндрические колеса методом обката с непрерывным делением шлифуют на станках RZ300E и RZS фирмы Reishauer (Швейцария). По результатам проведенных производственных испытаний рекомендованы к использованию следующие характеристики высокопористых кругов: для предварительного формообразования зубьев зубчатых колес из стали 16Х3НВФМБ-Ш (35—40 HRC) или ее аналогов целесообразно применение высокопористых кругов зернистостью 16, твердостью от М3 до СМ1 и структурой № 10, а для чистового шлифования — высокопористые круги зернистостью 10—12, твердостью ВМ2—М2 и структурой № 10. Применение нового инструмента позволяет повысить производительность обработки за счет увеличения подачи на врезание на черновых проходах в 2 раза, при этом обеспечиваются все требования по точности геометрии и качеству обработки зубчатого колеса.

На станке ZSTZ315 фирмы Niles (Германия), реализующем метод обкатного шлифования зубчатых колес с периодическим делением, применяют высокопористые шлифовальные круги с двусторонним коническим профилем размером 350 × 32 × 127 мм из электрокорунда белого 25А, зернистостью 16 и 25, твердостью М3—СМ2, со структурой № 10. При этом обрабатывают зубчатые колеса из цементированной и закаленной стали 16Х3НВФМБ-Ш (62—64 $HRC_э$) с m = 10 мм, b = = 120 мм, z = 23.

Обработку конических зубчатых колес с круговым зубом и шлицевых торцевых соединений повышенной точности "Курвик" на стальных и титановых заготовках методом врезного шлифования с последующим обкатом и периодическим делением выполняют на станках WNC 30 и W800 CNC фирмы Klingelnberg (Германия) и 463 фирмы Gleason (США). При этом использовали высокопористые круги кольцевого профиля для станков фирмы Klingelnberg размером 115 × 100 × 75, 150 × 110 × 100, 170 × 100 × 130, 220 × 115 × 180, 310 × 110 × 260 мм и чашечного профиля для станка фирмы Gleason размером 220 × 110 × 180 мм. В зависимости от марки обрабатываемого материала, метода обработки и требований по качеству поверхности высокопористые круги изготовляют из электрокорунда 25А или из карбида кремния зеленого 64С зернистостью 6—16 на керамической связке твердостью ВМ2—СМ1 и структурой № 6—12. По результатам испытаний высокопористые круги с характеристикой 25А 16П СМ1 12К рекомендованы для предварительного профилирования круговых зубьев конических зубчатых колес и шлиц соединения "Курвик" на заготовках из сталей 40Х (43—48 HRC), 16Х3НВФМБ-Ш (39—40 HRC), а круги с характеристикой 64С 16П СМ1 12К — для профилирования шлиц соединения "Курвик" на заготовках из титановых сплавов ВТ6, ВТ20 и др. Для чистового шлифования конических зубчатых колес используют шлифовальные круги с характеристиками 25А 8П М1—2 10К, которые обеспечивают требуемые производительность, точность и качество обработки.

Освоена технология шлифования плоских и цилиндрических базовых поверхностей зубчатых колес высокопористыми кругами. Ранее после шлифования кругами с нормальной структурой, как правило, около 15—20 % обрабатываемых деталей имели дефекты поверхностного слоя в виде прижогов и микротрещин.

Для испытаний изготовили высокопористые круги прямого профиля размером 25 × 25 × 6, 35 × 40 × 10, 40 × 40 × 13, 60 × 50 × 20, 100 × × 60 × 20, 250 × 20 × 76, 350 × 40 × 127, 400 × × 60 × 127 и 450 × 63 × 203 мм и характеристиками 25А 16П М2—СМ1 12К, 25А 25П М3—СМ1 12К, 25А 40П М3—СМ1 12К. Испытания проводили на различных операциях внутреннего, плоского и круглого наружного шлифования зубчатых колес различной номенклатуры из цементированных и зака-

ленных сталей 16Х3НВФМБ-Ш (60—62 HRC) и 20ХН2МА (58—60 HRC).

Обработку посадочного отверстия зубчатых колес проводили на внутришлифовальных станках Si-4, Si-80 × 100 и Livnica Kikinda высокопористыми кругами прямого профиля размером 25 × 25 × 6, 35 × 40 × 10, 40 × 40 × 13, 60 × 50 × 20 мм. Режим обработки: скорость круга 30 м/с, скорость вращения детали 80—150 м/мин, подача на врезание 0,015—0,025 мм, продольная подача 2—8 м/мин. Правку рабочей поверхности выполняли с помощью алмазного карандаша. Охлаждение осуществляли 2 %-ным содовым раствором.

Плоское шлифование торцовых поверхностей проводили на отечественных станках 3Г71, 3П741АФ10 и станке Jotes-SPC-20b (Чехия) высокопористыми кругами прямого профиля размером 250 × 20 × 76 и 450 × 63 × 203 мм. Режимы шлифования: скорость круга 30—35 м/с, скорость стола 10—20 м/мин, подача на врезание 0,015—0,025 мм, продольная подача 0,05—2 мм/дв. ход. Правку круга производили алмазным карандашом, а охлаждение зоны резания — 2 %-ным содовым раствором.

Наружные цилиндрические поверхности зубчатых колес шлифовали на станках Kellenderger 600U, Studer S20 и S30 (Германия) кругами размером 350 × 40 × 127 и 400 × 60 × 127 мм на режимах обработки: скорость круга 30—35 м/с, скорость вращения детали 60—200 м/мин; подача на врезание 0,015—0,025 мм/дв. ход, продольная подача 5—12 м/мин. Правку кругов проводили алмазным карандашом при охлаждении СОТС на основе индустриального масла.

В процессе испытании и последующем применении технологических процессов внутреннего, плоского и круглого наружного шлифования зубчатых колес травлением и магнито-порошковым контролем прижоги и микротрещины не выявлены.

Результаты исследований показали также, что новая технология позволяет эффективно обрабатывать модифицированные зубчатые колеса, у которых для улучшения эксплуатационных свойств конструктивно предусматривается отклонение от теоретического эвольвентного профиля. Это направление очень перспективно для изготовления силовых зубчатых передач.

Зубчатые колеса, обработанные по новой технологии, приведены на рисунке.

Ниже приведены примеры использования высокопористых кругов на операциях зубошлифования.

Шлифование методом обката с единичным делением. Проведены испытания и внедрение новой технологии формообразования зубьев конических спиральных зубчатых колес из закаленной легированной стали 16Х3НВФМБ-Ш на станке G30 фирмы Klingelnberg высокопористыми кругами кольцевого

Зубчатые колеса, обработанные высокопористыми абразивными кругами

профиля размером 220 × 112 × 180 мм. Охлаждение — СОТС на основе масла Shell Macron 2425 S-14. Правку рабочей поверхности шлифовального круга выполняли циклическим алмазным правящим роликом.

Конические зубчатые колеса с m_n = 3,9942 мм, z равно 25 и 30 обрабатывали в два этапа: предварительное профилирование зубьев методом глубинного шлифования (взамен зубофрезерования) на заготовках после объемной закалки на твердость 23,5—35,5 HRC и чистовое шлифование поверхностей зубьев после цементации и закалки на твердость 61—65 HRC. Предварительное нарезание зубьев производили высокопористыми кругами с характеристиками 25А 16П СМ1 10К и 25А 12П СМ1 10К на следующих режимах шлифования: скорость круга 25 м/с, скорость подачи врезания 16 мм/мин, скорость обката предварительно 0,5—1°/с, окончательно — 3—5°/с. Правка круга встречная (направления вращения круга и ролика различные) с величиной правки 0,1 мм и скоростью подачи 200 мм/мин.

Чистовое шлифование зубьев производили за семь проходов кругами с характеристиками 25А 8П М1 10К и 25А 6П М1 10К на следующих режимах шлифования: скорость круга 25 м/с, осевая подача круга на деталь на первом—пятом проходах 0,1 мм, шестой—седьмой проходы — без подачи, скорость обката 5—7 °/с. Правка шлифовального круга попутная (направление вращения круга и ролика совпадают) с величиной правки 0,09 мм и скоростью подачи 30—100 мм/мин.

При чистовом шлифовании наилучшей режущей способностью характеризуются круги с характеристикой 25А 8П М1 10К, обеспечивая все требования по точности и качеству обработки. Параметр шероховатости поверхности зубьев Ra = 0,32÷0,4 мкм, травлением и магнитным контролем прижоги и микротрещины на поверхностях зубьев не выявлены.

Хорошие результаты получены при производственных испытаниях технологии шлифования конических колес с круговым зубом из стали 20Х3МВ твердостью 59—62 HRC с параметрами m = 2,25 мм, z = 48 и m = 2,99 мм, z = 25. Обработку на станке 463 фирмы Gleason выполняли высокопористыми кругами чашечного профиля размером 120 × 110 × 72 мм с характеристикой 25А 8П М1 10К на режиме: скорость круга 22 м/с, удаляемый припуск 0,1—0,15 мм, число проходов 15, скорость обката 8,14 с/зуб с частотой правки круга через четыре прохода. При этом обеспечено бесприжоговое шлифование с точностью по 6-й степени, накопленной погрешностью по шагу 0,027 мм и параметром шероховатости обработанной поверхности зуба Ra = 1,0÷1,25 мкм.

Чистовое шлифование цилиндрических прямозубых зубчатых колес из закаленной легированной стали 20Х3МВФА (64 HRC) с m = 2 мм, z = 23 и b = = 15 мм проводили методом обката с единичным делением на отечественном станке 5М841. Испытания проводили при шлифовании высокопористыми кругами размером 4 350 × 20 × 127 мм с характеристикой 25А 25П СМ1 10К отечественного производства на следующих режимах: скорость шлифовального круга 25 м/с, подача на врезание 0,05 мм, число двойных ходов 85 дв. ход/мин. Охлаждение зоны резания — СОТС на основе индустриального масла. Циклическую правку круга осуществляли алмазным карандашом.

Установлено, что высокопористые круги в условиях чистового шлифования методом обката с единичным делением обладают высокой режущей способностью и размерной стойкостью. Их применение на данной операции исключило появление прижогов на обработанных поверхностях зубьев. Обеспечены также все требования чертежа по точности и качеству обработки: степень точности 6—5—5, погрешность профиля зуба 6 мкм, погрешность направления зуба 7 мкм, наибольшая разность шагов зацепления 6 мкм и параметр шероховатости зубчатого венца Ra = 0,8÷1,6 мкм.

Технология шлифования крупномодульных зубчатых колес методом обката с единичным делением реализована на отечественном станке 5А843. При шлифовании абразивными кругами нормальной структуры с характеристикой 24А 40 М2 6—8К5 отечественного производства на обработанных поверхностях зубьев всегда имели место термические повреждения в виде прижогов и микротрещин, что приводило к отбраковке готовых деталей.

Для испытаний разработали и изготовили партию высокопористого абразивного инструмента типоразмера 1 400 × 25 × 127 следующих характеристик: 25А 12П М3 12К, 25А 16П М3 12К, 25А 16П СМ1 12К, 25А 25П СМ1 12К.

Предварительно обработанные фрезерованием зубчатые колеса из легированной стали 20Х2Н4А после ионной цементации и закалки на твердость поверхности 56 HRC с m = 10 мм, z = 73 и b = 120 мм обрабатывали на следующих режимах чистового шлифования: скорость круга 30 м/с, подача на врезание 0,05 мм, число двойных ходов 60 дв. ход/мин. Охлаждение зоны резания — СОТС на основе индустриального масла. Правку шлифовального круга осуществляли алмазным карандашом после обработки пяти зубьев. Прижоги и микротрещины на обработанных поверхностях не наблюдали. Обеспечены все требования чертежа по точности и качеству обработанной поверхности: точность зубчатого колеса соответствовала степени 7В, колебание длины общей нормали 0,06 мм, радиальное биение зубчатого венца 0,08 мм, погрешность профиля зуба 0,024 мм, погрешность направления зуба 0,02 мм, предельное отклонение шага 0,024 мм, параметр шероховатости обработанных поверхностей зубьев $Ra \leqslant$ 0,8 мкм. Производительность обработки и шероховатость обработанной поверхности, как показали испытания, зависят от характеристики шлифовального круга. Для режимов обработки, принятых на заводе, целесообразно использовать инструмент с характеристикой 25А 25П СМ1 12К.

При обработке зубчатых колес из закаленной стали 20Х2Н4А (53—57 HRC) на отечественном станке 5843 в одинаковых условиях были испытаны шлифовальные круги типоразмера 4 400 × 25 × 127 с характеристикой 24А 25Н СМ1 8К1, изготовленные ПО "Уральские абразивы", и новые высокопористые круги с характеристикой 25А 25П СМ1 12К. Для обработки выбрали зубчатые колеса с m, равным 8 и 9 мм, z, равном 25 и 22, и b, равной 112 и 140 мм соответственно.

Режимы шлифования: скорость шлифовального круга 35 м/с, подача на врезание 0,05—0,15 мм, подача на выхаживание 0,02 мм, число двойных ходов 60—84 дв. ход/мин. Зону резания охлаждали двухсторонней подачей индустриального масла И-20 с расходом 25—30 л/мин.

Применение высокопористых кругов оптимальной характеристики на операции чистового шлифования методом обката с единичным делением гарантированно исключает появление прижогов и микротрещин на обработанных поверхностях зубьев, которые имели место при шлифовании кругами нормальной структуры.

Шлифование методом обката с непрерывным делением. Проведены производственные испытания чистового шлифования зубьев цилиндрических зубчатых колес с m, равным 1,5 и 2 мм, и z, равным 92 и 93, из цементированной закаленной стали 18ХГТ (57—63 $HRC_э$) высокопористыми абразивными кругами. Обработку производили методом

обката с непрерывным делением кругами типоразмера 1 350 × 84 × 160 с характеристиками 99А 100 I 10V и 99А 80К 10V.

При шлифовании зубчатых колес высокопористыми кругами обеспечиваются требования чертежа по степени точности 6-В и шероховатости обработанной поверхности зубьев ($Ra \leqslant 0{,}63$ мкм). В сравнении с серийными кругами новый высокопористый инструмент позволил исключить прижоги на шлифованной поверхности зубьев, а также повысить производительность обработки до 2 раз за счет возможности форсирования режима шлифования на предварительных проходах.

С применением новых высокопористых кругов освоена технология формообразования зубьев зубчатых колес методом обката с непрерывным делением высокопористыми абразивными кругами. Профилируются косозубые цилиндрические зубчатые колеса с $m = 0{,}4 \div 1$ мм, $z = 40 \div 60$ и $b = 6$ мм, правым углом наклона зубьев 3°05′ из легированных сталей 12ХН3А, 14Х17Н2А, 20Х13, 45Х14Н14В2М, термообработанных на твердость 36—40 HRC.

Применявшиеся ранее для этих операций абразивные круги с характеристикой 24А 8П С1 9К5 отечественного производства обладали низкой кромкостойкостью, часто подвергались правке и замене. Процесс шлифования сопровождался возникновением прижогов на обработанных поверхностях зубьев.

Испытания и внедрение новой технологии профилирования зубчатых колес проводили на отечественных станках 5В830 и Е3С0918 производства егорьевского завода "Комсомолец". Шлифование высокопористыми кругами прямого профиля с размером 300 × 50 × 127 и 400 × 63 × 203 мм и характеристиками 25А 3П С1 10К, 25А 6П С1 10К, 25А 6П С2 10К выполняли на следующем режиме: скорость круга 35 м/с, глубина обработки 0,9—2,25 мм, продольная подача 0,16—0,18 мм/об. В качестве охлаждения использовали индустриальное масло.

При обработке высокопористыми кругами отмечено, что они по сравнению с применяемым ранее инструментом имеют лучшую режущую способность, обеспечивают бесприжоговую обработку, а также требования чертежа по шероховатости поверхности и точности зубчатого колеса при сокращении необходимого количества правок в 1,5—2 раза.

Профильное шлифование. Проведены испытания при профильном глубинном и чистовом шлифовании зубчатого венца внутреннего зацепления планетарного редуктора. Шлифование зубчатого профиля с $m = 4$ мм, $z = 126$, $\alpha = 20°$ и высотой венца 81 мм из стали 18Х2Н4МА перед азотированием производили на модернизированном для профильного шлифования зубчатых колес многоцелевом обрабатывающем центре "Horison 3" (Италия) высокопористым кругом размером 200 × 10 × 52 мм с характеристикой 25А 25П СМ1 12К5 на режиме обработки: скорость круга 26 м/с, скорость продольной подачи 100—800 мм/мин. Глубинное шлифование производили с глубиной 4 мм на проход (по условиям жесткости системы резания), чистовая обработка до 0,1 мм на проход круга при общем припуске 0,5—0,6 мм на сторону зуба. Правка круга периодическая, попутная величиной 0,1 мм через восемь зубьев при глубинном шлифовании и через 22—35 зубьев при чистовой обработке алмазным профильным роликом при соотношении скоростей ролика и круга 0,7—0,8. Охлаждение — 2,5 %-ным водным раствором эмульсии "Экокул-Солюбль".

Установлено, что в сравнении с серийным инструментом с характеристикой 25А 25П СМ2 7К5 высокопористые круги отличаются лучшими режущими свойствами, меньше засаливаются, что позволяет повысить производительность чистового шлифования в 2 раза за счет увеличения подачи на врезание при обеспечении бездефектной обработки поверхности, а при глубинном шлифовании заменить лезвийную обработку. Точность обработки повышена до 4—4—4 (ранее обеспечивалась точность 5—4—4).

Освоена бесприжоговая технология глубинного обката с периодическим делением на зубошлифовальном станке 463 фирмы Gleason конических шестерен с круговым зубом из стали 20Х3МВФ-Ш. Обрабатывали шестерни с внешним окружным модулем 2,4 мм, числом зубьев 22 и 29, углом наклона зубьев 15° и соответственно правым и левым направлением зуба со степенью точности 6—5—5 и $Ra \leqslant 0{,}4$ мкм.

Высокопористые круги чашечного профиля размером 120 × 110 × 72 мм и с характеристиками 25А 16П СМ1 10К и 25А 8П М1 10К использовали для предварительного профилирования заготовки с твердостью 302—363 НВ и чистового шлифования после азотирования на твердость более 90 HRN15.

Зубчатые колеса из стали 12Х2Н4А-Ш с $m = 4{,}5$ мм, $z = 97$, $\alpha = 20°$, $\beta = 21°$, $b = 45$ мм после цементации и закалки на твердость не менее 61 HRC обрабатывали на профилешлифовальном станке OPAL-80 фирмы Oerlikon (Швейцария) высокопористым шлифовальным кругом размером 300 × 25 × 127 мм с характеристикой 25А 16П М1 12К5. Зубья обрабатывали методом профильного шлифования на режимах: скорость шлифовального круга 23 м/с, вертикальная подача 1800 мм/мин, радиальная подача (глубина на врезание) 0,04—0,18 мм, припуск на обработку 0,3 мм на сторону, количество проходов шлифования 8. Правку круга производили после обработки 12 зубьев.

В результате обработки все технические требования чертежа детали и технологии по точности и шероховатости обработанной поверхности выпол-

нены, шлифовочные прижоги по профилям зубьев травлением не обнаружены. В сравнении со шлифовальными кругами фирмы Winterthur (Австрия), которыми был оснащен станок OPAL-80 при поставке на завод, новый высокопористый инструмент позволил вести обработку с более форсированной радиальной подачей — в 1,5 раза больше при снижении времени шлифования до 30 %.

При оснащении профилешлифовального станка модели OPAL-80 целесообразно иметь комплектацию из высокопористых кругов прямого и конического профилей размером 125 × 12 × 51, 300 × 12 × 127, 300 × 25 × 127 и 300 × 32 × 127 мм с характеристикой А99 80 I 12V (25А 16П М2 12К) и рабочей скоростью до 50 м/с. Данная комплектация обеспечивает следующее:

1. Профильное глубинное шлифование "по целому" цилиндрического зубчатого колеса из стали 40Х (300 НВ) с m = 6 мм, z = 20, углом зацепления α = 20°, b = 50 мм кругом размером 300 × 25 × 127 мм за пять циклов шлифования на следующих режимах: скорость резания 28 м/с, скорость продольной подачи 2000 мм/мин.

За первый цикл шлифования производится предварительное нарезание зубьев на глубину впадины 10,22 мм за 15 дв. ходов с глубиной резания на проход 0,34 мм. За второй цикл обработки — снятие припуска с глубиной резания 0,25 мм. Получистовое шлифование зубьев с удалением припуска 0,2 мм осуществляется за 2 дв. хода с глубиной резания 0,05 мм. Четвертый и пятый циклы чистового шлифования производятся с удалением припуска 0,04 и 0,03 мм за 1 дв. ход соответственно. За время обработки зубчатого колеса осуществляется 19 циклов правки шлифовального круга.

2. Чистовое профильное шлифование косозубых цилиндрических колес с m = 4 мм, z, равным 29 и 30, α = 20°, β = 14,5833°, b = 25 мм из стали 12ХН3А после цементации и закалки на твердость 58—60 HRC. Обработка производится со скоростью 24 м/с и скоростью продольной подачи 2000 мм/мин за четыре цикла (табл. 1).

3. Чистовое профильное шлифование косозубого колеса с m = 4 мм, z = 11, α = 20°, β = 31,1667°, b = 22,25 мм из стали 40ХН2МА (280—300 НВ) после термической обработки "улучшение". Шлифование производится также за четыре цикла со скоростью резания 34 м/с и скоростью продольной подачи 2000 мм/мин (табл. 2). После чистового профильного шлифования зубчатые колеса соответствуют 3—4-й степени точности, параметр шероховатости обработанных поверхностей зубьев Ra = 0,32÷0,4 мкм, прижоги и микротрещины во всех случаях отсутствуют.

4. Профилирование "по целому" и чистовое шлифование эвольвентных шлицев с m = 1,5 мм, z = 35, α = 30°, b = 31 мм на заготовке вала из термоулучшенной стали 40ХН (280—300 НВ) перед азотированием. Предварительное нарезание и окончательная обработка шлицев выполняются за четыре цикла со скоростью резания 34 м/с и продольной подачей круга 2000 мм/мин (табл. 3).

Таблица 1

Номер цикла	Припуск, мм	Глубина резания, мм	Число проходов	Величина правки, мм	Число впадин, обработанных до правки
1	0,200	0,100	2	0,050	28
2	0,800	0,067	12	0,040	7
3	0,030	0,015	2	0,035	14
4	0,005	0,005	1	Без правки	

Таблица 2

Номер цикла	Припуск, мм	Глубина резания, мм	Число проходов	Величина правки, мм	Число впадин, обработанных до правки
1	1,60	0,130	12	0,050	5
2	0,20	0,030	6	0,040	5
3	0,03	0,015	2	0,035	11
4	0,01	0,005	2	Без правки	

Таблица 3

Номер цикла	Припуск, мм	Глубина резания, мм	Число проходов	Величина правки, мм	Число впадин, обработанных до правки
1	0,60	0,100	6	0,050	15
2	0,80	0,080	10	0,040	4
3	0,03	0,015	2	0,035	14
4	0,01	0,005	2	Без правки	

Новая технология обеспечивает формообразование шлицевого вала методом шлифования в кратчайшие сроки, исключив при этом необходимость использования специального оборудования, а также проектирования и изготовления червячных модульных фрез.

В результате внедрения новой технологии зубошлифования высокопористыми кругами стало возможным высокопроизводительное и качественное изготовление зубчатых колес с высокой степенью точности (до СТ 3—4) для нужд предприятий нефтехимической, газовой и других отраслей промышленности. Технологические возможности и универсальность применяемого оборудования и высокопористого абразивного инструмента позволяют выполнять как серийные, так и единичные заказы по изготовлению зубчатых колес из конструкционных легированных сталей различных марок, в том числе после химико-термической обработки.

Ю. С. БАГАЙСКОВ, канд. техн. наук
(Волжский институт строительства и технологий – филиал Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета),
В. М. ШУМЯЧЕР, д-р техн. наук
(Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет)

Улучшение структурно-механических и эксплуатационных свойств абразивных инструментов с порообразователем

Структура композиционного материала абразивного инструмента, как известно, состоит из абразивных зерен, связки и пор. Основными параметрами являются степень твердости и номер структуры, зависящие от пористости материала.

Абразивный инструмент на керамической связке изготовляют прессованием с заранее определенной степенью пористости за счет имеющихся неплотностей в объемах абразивного зерна и связующего [1]. Существенно увеличивается степень пористости при введении в состав формовочной массы порообразователей, из которых наиболее практичными являются стеклянные или керамические пустотелые шарики [2], расплавляющиеся во время обжига заготовок инструмента, и дробленая скорлупа фруктовых косточек[1], соответственно, выгорающая при обжиге. Рассеянная по фракциям зернистостей скорлупа экономичнее и технологичнее в производстве.

В связи с тем, что порообразователь вводится дополнительно к расчетной рецептуре, при заданных номере структуры и степени твердости фактически за счет увеличения степени пористости изменяется содержание абразивного зерна по отношению к остальным компонентам, а следовательно, и номер структуры.

Рецептуру абразивной массы рассчитывают по отношению к 100 весовым частям (в. ч.) абразивного материала. Содержание абразивного материала, отнесенное к 100 %, можно определить по следующей формуле:

$$A_{100} = 100A/(A + B + C + D), \qquad (1)$$

где A, B, C и D — объемное содержания абразива, связки, клеящего увлажнителя и порообразователя соответственно, определенные как отношения их содержания, в. ч., к насыпным массам.

[1] А. с. 181 2087 (СССР).

На рис. 1 приведены результаты расчета A_{100} для абразивного инструмента с исходным номером структуры № 10 для степени твердости ВМ-СТ при различном содержании порообразователя (до 30 в. ч.).

Анализ показывает, что с увеличением содержания порообразователя объем абразива уменьшается, при этом фактический номер структуры возрастает в сторону открытости. Результат зависит и от степени твердости — для большей твердости изменение меньше, однако незначительно, в пределах одного-двух номеров структуры. Для инструмента из карбида кремния при равных условиях изменения по сравнению с электрокорундом меньше, примерно на один номер структуры.

Важным параметром является размер частиц порообразователя, т. е. его зернистости, по отношению к зернистости абразива. Производным в зависимости от содержания порообразователя будет

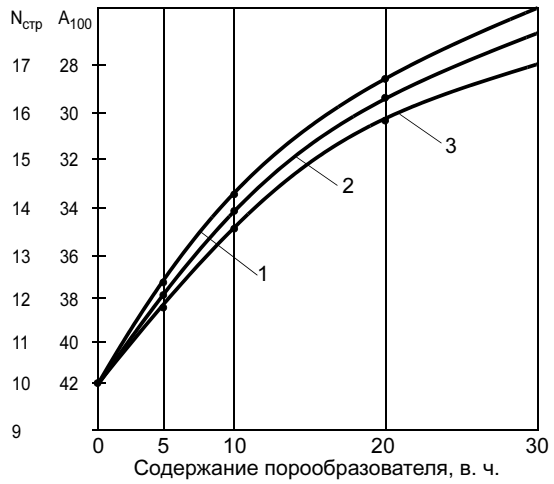


Рис. 1. Зависимость содержания абразивного зерна и номера структуры от содержания порообразователя при степени твердости ВМ (*1*), СМ (*2*) и СТ (*3*)

отношение количества зерен абразива n_1 к количеству частиц порообразователя n_2'. Это отношение можно определить по формуле

$$\frac{n_1}{n_2'} = \frac{K^3}{X}\frac{\gamma_2'}{\gamma_1}100, \qquad (2)$$

где K — соотношение диаметров порообразователя d_2' и абразивного зерна d_1; X — содержание порообразователя, в. ч.; γ_1, γ_2' — удельные массы абразива и порообразователя соответственно.

На рис. 2 приведены зависимости n_1/n_2' от содержания порообразователя при различных значениях соотношения K для инструмента из электрокорунда. Видно, что соотношение n_1/n_2', определяющее количество зерен абразива на одну частицу порообразователя, с увеличением содержания порообразователя существенно уменьшается, достигая при 30 в. ч. и K = 1 уровня примерно одного зерна на одну частицу. Это соотношение характерно для равномерной структуры обычного абразивного инструмента. Практичным для образования крупных пор является соотношение размеров порообразователя и зерна K = 3÷4 при содержании порообразователя 10—20 в. ч. Тогда на частицу порообразователя приходится 40—180 зерен абразива. Получается высокопористый и высокоструктурный (структуры № 13—16) инструмент, работающий по принципу прерывистого шлифования, обеспечивающий бесприжоговую обработку с повышенными подачей и глубиной резания.

Представляет интерес исследование влияния введения порообразователей на газопроницаемость, характеризующую степень открытости структуры.

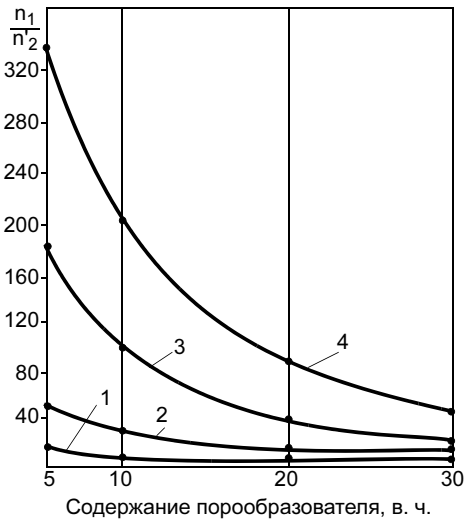


Рис. 2. Зависимость отношения количества зерен абразива n_1 к количеству частиц порообразователя n_2' от содержания порообразователя при K, равном 1 (*1*), 2 (*2*), 3 (*3*) и 4 (*4*)

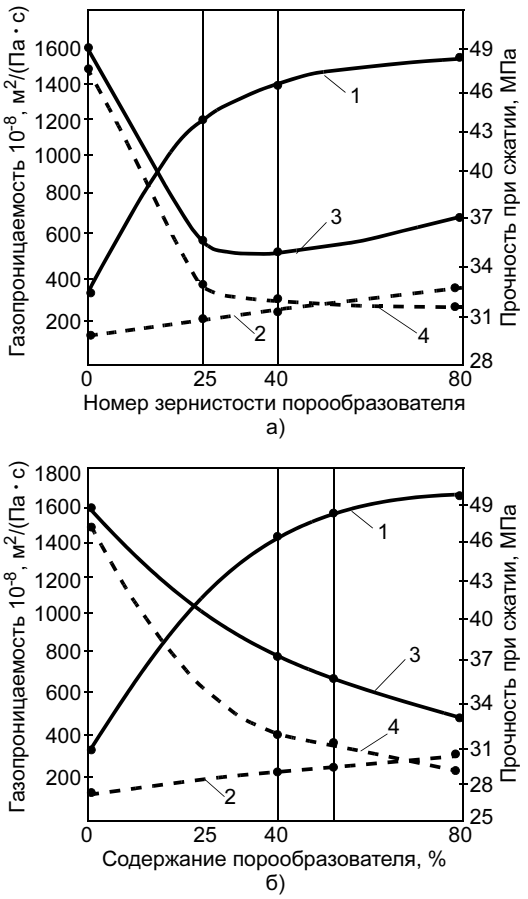


Рис. 3. Зависимость газопроницаемости (*1*, *2*) и прочности при сжатии (*3*, *4*) высокопористого материала от зернистости (*а*) и содержания (*б*) порообразователя: *1*, *3* — электрокорунд 91А; *2*, *4* — карбид кремния 64С (структура № 10)

На рис. 3 приведены зависимости газопроницаемости материала инструмента из электрокорунда и из карбида кремния от зернистости и содержания порообразователя. Видно, что введение порообразователя с зернистостью № 25, т. е. такой же как и абразива, приводит к ее увеличению для электрокорунда почти в 3 раза, а с возрастанием зернистости до № 80 — в 5—6 раз. Аналогично влияние содержания порообразователя в количестве 7—15 % от массы абразива. Однако для карбида кремния уровень повышения газопроницаемости и при максимальных параметрах порообразователя не превышает 2 раз. Это объясняется повышенным содержанием и природой свойств спекающейся связки при карбиде кремния по сравнению с плавящейся при электрокорунде, не позволяющей резко повысить степень развитости поровой структуры материала инструмента. При этом, однако, наблюдается некоторое снижение прочности материала инструмента.

Номер структуры	Порообразователи		P_z, Н			P_y, Н		
	Зернистость	Количество, % от массы образцов	Глубина шлифования, мм/дв.ход					
			0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04
6	—	—	47	65	—	105	146	—
10	25	10	46	62	76	104	149	173
	40	10	44	58	73	103	136	170
	63	10	44	57	71	102	135	168
	80	10	43	57	70	102	135	166
	80	7	45	60	74	103	140	172
	80	15	43	56	68	102	130	162

Таким образом, пористая структура абразивного инструмента определяется соотношением параметров структура—твердость. С увеличением номера структуры в сторону открытости размер пор возрастает, при малых твердостях достигая и превышая размер абразивных зерен. Существенно увеличивается степень пористости при введении порообразователей, при этом фактический номер структуры с увеличением содержания порообразователя до 20—30 в. ч. возрастает, например, с № 10 до 13—18. Существенна роль зернистости порообразователя по отношению к зернистости абразива, от нее зависит соотношение количества зерен абразива и частиц порообразователя в объеме инструмента: чем зернистость порообразователя больше, тем это соотношение выше. Введение порообразователя приводит к существенному (в 2—6 раз) возрастанию параметра газопроницаемости, характеризующего степень открытости, развитости структуры инструмента.

Для оценки эксплуатационных свойств абразивных инструментов с порообразователем из дробленых фруктовых косточек подготовлена партия шлифовальных кругов с характеристикой 1 150 × 20 × 32 из электрокорунда 91А зернистостью 25 и твердостью СМ2. Обрабатывали сталь ХВГ. Определяли следующие показатели: составляющие силы шлифования P_z и P_y; коэффициент шлифования $K_ш$; параметр шероховатости поверхности Ra; образование прижогов [3].

В таблице приведены значения составляющих силы шлифования P_z и P_y. Наибольшие значения составляющих сил шлифования получены на базовом круге. Предельная глубина бесприжогового шлифования данным кругом стали ХВГ составила 0,02 мм/дв. ход. Далее (при 0,03 мм/дв. ход) уже проявляются штриховые прижоги, потом усиливаются. Введение порообразователя увеличивает предельную глубину шлифования до 0,04 мм/дв. ход. При обработке высокопористыми кругами снижаются силы шлифования на 6—10 %; чем больше порообразователя, тем больше степень снижения. С увеличением зернистости порообразователя силы шлифования также снижаются.

Значения коэффициентов шлифования шлифкругами стали ХВГ хорошо коррелируют со значениями составляющих силы шлифования: большим значениям $K_ш$ соответствуют большие значения сил. При шлифовании базовым кругом в этой области $K_ш$ выше, чем высокопористыми кругами. С увеличением глубины шлифования $K_ш$ для всех кругов уменьшается.

Наиболее интенсивное снижение $K_ш$ происходит на базовом круге; на глубине шлифования 0,03 мм/дв. ход $K_ш$ ниже, чем у высокопористых кругов.

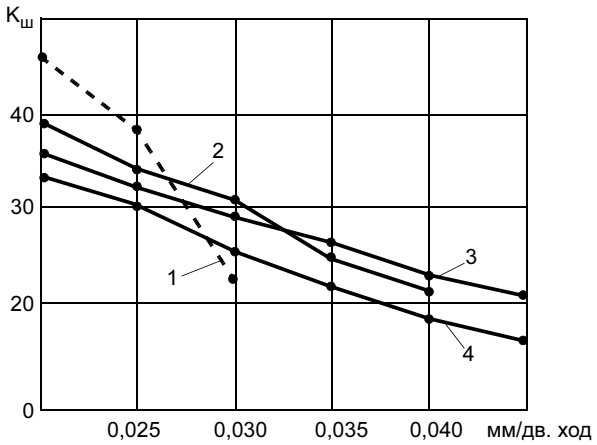


Рис. 4. Зависимость коэффициента шлифования от глубины шлифования при введении порообразователя 7 (*2*), 10 (*3*) и 15 (*4*) % по сравнению с кругом структуры № 6 (*1*)

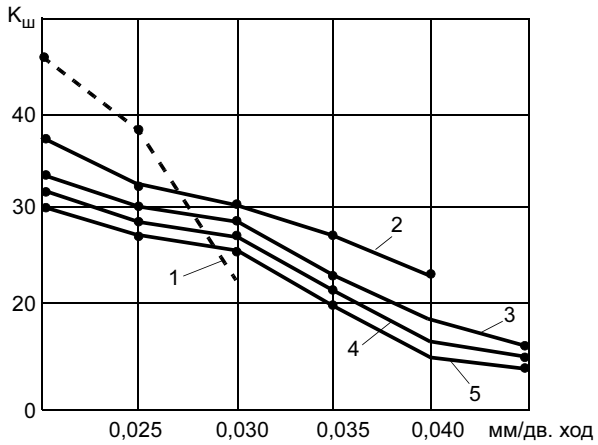


Рис. 5. Зависимость коэффициента шлифования от глубины шлифования при зернистости порообразователя № 25 (*2*), 40 (*3*), 63 (*4*) и 80 (*5*) по сравнению с кругом структуры № 6 (*1*)

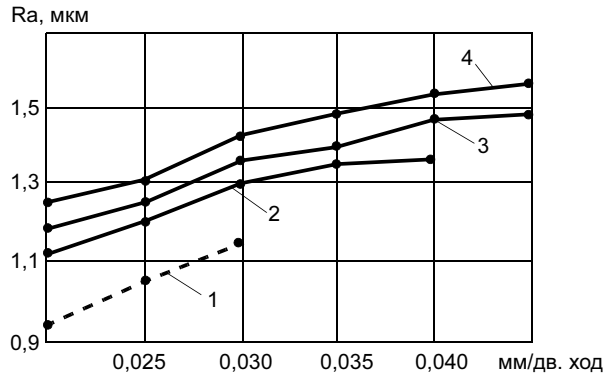


Рис. 6. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности от глубины шлифования при введении порообразователя 7 (*2*), 10 (*3*) и 15 (*4*) % по сравнению с кругом структуры № 6 (*1*)

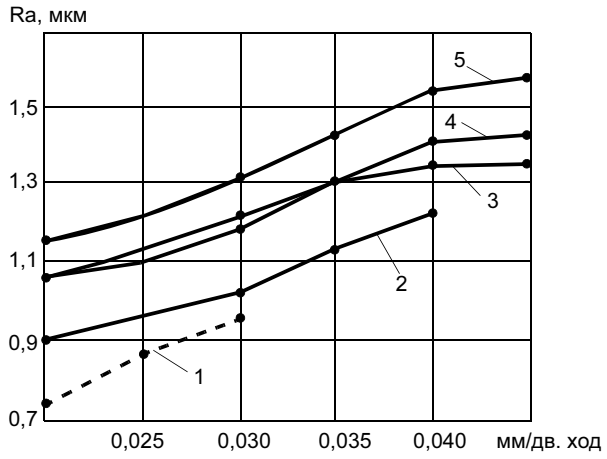


Рис. 7. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности от глубины шлифования при зернистости порообразователя № 25 (*2*), 40 (*3*), 63 (*4*) и 80 (*5*) по сравнению с кругом структуры № 6 (*1*)

Установлена следующая закономерность влияния содержания порообразователя и его зернистости на $K_ш$: с увеличением содержания и зернистости порообразователя $K_ш$ снижается (рис. 4, 5).

В связи с тем, что введение порообразователя с зернистостью выше, чем абразива, увеличивает расстояние между зернами абразива, шероховатость поверхности при шлифовании высокопористыми кругами несколько выше, чем базовым кругом (рис. 6, 7). С увеличением содержания и зернистости порообразователя шероховатость поверхности несколько возрастает. Наибольшее влияние на шероховатость оказывает зернистость порообразователя. С увеличением номера зернистости от 25 до 80 параметр шероховатости поверхности возрастает в 1,25—1,3 раза, а с изменением количества порообразователя от 7 до 15 % Ra изменяется не больше, чем на 10 %. Кроме того, шероховатость возрастает и при увеличении глубины резания, что характерно при использовании высокопористых кругов.

В целом в связи с негативным влиянием повышения пористости шлифовальных кругов на шероховатость обрабатываемой поверхности появляется необходимость при прочих равных условиях снижать зернистость абразивного материала высокопористого инструмента на один-два номера.

Установленные закономерности распространяются и на инструменты другой зернистости и из карбида кремния, и при обработке других материалов.

Таким образом, результаты исследований подтверждают позитивный характер изменения структурно-механических свойств композиционного материала абразивных инструментов с введением порообразователя определенной характеристики, показывают степень повышения эксплуатационных свойств, качества обработки, перспективность технологических возможностей инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Любомудров В. Н., Васильев Н. Н., Фальковский Б. И.* Абразивные инструменты и их изготовление. М. — Л.: Машгиз, 1953. 376 с.
2. *Курдюков В. И., Коротовских В. К.* Методы получения высокопористых структур шлифовальных инструментов из СТМ на органических связках // Сверхтвердые материалы. 1993. № 4. С. 30—35.
3. *Физико-механические* и эксплуатационные свойства высокопористых фасонных шлифкругов для заточки лезвийного инструмента / Ю. С. Багайсков, В. А. Носенко, А. В. Лежнева, Л. В. Придорогина // Тез. докл. конф. "Интерграйнд—91". Л., 1991. С. 83—88.

В. А. САНИНСКИЙ, канд. техн. наук, Ю. М. БЫКОВ, канд. техн. наук, Н. А. СТОРЧАК, инж.
Волгоградский государственный технический университет

Методы стабилизации предельных зазоров коренных подшипников дизелей

При расчете минимальных и максимальных зазоров в подшипниках скольжения коленчатого вала как одиночных шатунных, так и соосных коренных применяются методы максимума-минимума и вероятностный [1, 2]. Согласно работе [2], метод максимума-минимума экономически целесообразен для машин невысокой точности или для цепей, состоящих из малого числа звеньев.

При использовании метода максимума-минимума допуск замыкающего звена определяют как сумму допусков составляющих звеньев:

$$\omega = \sum_{1}^{m} \omega_i, \qquad (1)$$

где m — число факторов, влияющих на зазоры в подшипниках скольжения; ω_i — поле рассеяния i-го фактора.

При вероятностном методе расчета допуск замыкающего звена

$$\omega = \eta \sqrt{\sum_{1}^{m} \lambda_i^2 \omega_i^2}, \qquad (2)$$

где η — коэффициент риска, согласно работе [2], при числе звеньев размерной цепи больше 6 значение η можно принять равным единице; λ_i — коэффициент относительного рассеяния i-го фактора, влияющего на зазор в подшипнике, равный $6\sigma_i/\omega_i$ (σ_i — стандартное отклонение).

Для нормального распределения $\lambda_i = 1$, для распределения равной вероятности (самый неблагоприятный случай) $\lambda_i = 1{,}73$.

В работе [1] рассмотрены основные факторы, влияющие на зазоры в подшипниках скольжения как шатунных, так и коренных и выполнены расчеты зазоров.

Используя методику расчета зазоров [1] и численные значения факторов, полученные для дизелей семейства 8 ЧВН 15/16 в результате экспериментальных [3] и исследовательских работ [3, 4], можно построить схему размерных цепей и рассчитать лимитирующий зазор подшипников.

К факторам, увеличивающим звенья размерной цепи лимитирующего зазора можно отнести:

ω_1 — погрешность формы коренных шеек (отклонение от круглости $\Delta_{фк}$ = 0,008 мм, отклонение от параллельности $\Delta_{фп}$ = 0,008 мм) по техническим требованиям чертежа коленчатого вала дизеля 8 ДВТ-330 (8 ЧВН 15/16);

ω_2 — погрешность формы коренных опор картера (может копироваться тонкостенными вкладышами при их затяжке) по техническим условиям чертежа может равняться допуску на диаметр опор (0,022 мм);

ω_3 — биение средних коренных шеек относительно крайних, равное 0,03 мм;

ω_4 — биение соседних коренных опор картера относительно крайних, равное 0,03 мм;

ω_5 — увеличение несоосности коренных опор в картере при нагреве до рабочих температур, равное 0,02 мм [1];

ω_6 — увеличение несоосности коренных шеек коленчатого вала при диаметре 64 мм после нагрева их до рабочих температур, по данным работы [1] для двигателей ЗМЗ ω_6 = 0,025 мм, для дизелей 8 ЧВН 12/16 данные не известны, их в расчете можно принять равными 0,025 мм;

ω_7 — разница диаметров коренных опор и шеек в нагретом состоянии при рабочих температурах, по данным работы [1], 0,018 мм;

ω_8 — (ω_9) — ступенчатость коренных шеек (опор), образовавшаяся в результате механической обработки их поверхностей с различающимися действительными допусками, равная 0,011 мм при направленности векторов разнотолщинности подшипников скольжения соседних опор в противоположные стороны;

ω_{10} — ступенчатость вкладышей подшипников скольжения, образовавшаяся от установки на соседние постели вкладышей с различающейся толщиной (разнотолщинностью), допуск на которую по чертежам составляет 0,025 мм, ω_{10} = 0,05 мм при направленности векторов разнотолщинности подшипников скольжения соседних опор в противоположные стороны;

ω_{11} — изменение биения коренных шеек вследствие разной жесткости коленчатого вала в различных его сечениях, как по длине вала, так и по углу его поворота вокруг продольной оси; для коленчатых валов дизелей 8 ЧВН 15/16 ω_{11} = 0,052 мм [4];

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 3

ω_{12} — изменение биения коренных опор вследствие дополнительной деформации от сборки картера с крышками подшипников; для коренных опор дизелей 8 ЧВН 15/16 ω_{12} = 0,020 мм.

Факторы, уменьшающие звено размерной цепи лимитирующего зазора:

ω_{13} — влияние затяжки вкладышей крышками подшипников в результате их круговой деформации, ω_{13} = 0,005 мкм на два вкладыша;

ω_{Δ} — замыкающее звено — зазор между поверхностями трения-скольжения в лимитирующих опорах.

Данные для расчета приведены в таблице.

В результате расчетов получены следующие данные.

При расчете методом максимумов-минимумов ω_{Δ} = 0,302 мм.

При расчете вероятностным методом с учетом погрешностей составляющих звеньев, распределенных по закону Гаусса, ω_{Δ} = 0,0978 мм, для распределения равной вероятности ω_{Δ} = 0,169 мм.

Исходя из того, что тяжелые дизели 8 ЧВН 15/16 выпускают малыми сериями и их поломки приводят к большим экономическим потерям, можно принять за основные факторы, рекомендованные в работах [2—3], и дополнительные факторы ω_9—ω_{13}, характерные для длинномерных картеров и коленчатых валов.

Однако при расчете, выполненном по методике работы [1], и тем более с учетом дополнительных факторов ω_9—ω_{13} запас $S_и$ на износ подшипников скольжения остается незначительным — не более 0,1 мм. Такие результаты получили вследствие того, что гарантированный зазор ω_{Δ} определяли по методу максимума-минимума на основе традиционного предположения, что диаметральные размеры коренных шеек и валов лежат в пределах поля допуска и могут иметь предельные значения. Если же исходить из принципа назначения зависимых допусков, то в расчете можно учитывать не все поле допуска, а конкретное действительное значение, составляющее часть поля допуска и меньшее рассеяние. Например, рассеяние размера коренных опор, обработанных режуще-деформирующей протяжкой [5], меньше рассеяния диаметров коренных опор, полученного растачиванием многорезцовой борштангой.

Для повышения запаса работоспособности коренных подшипников и многоопорного узла поддержки коленчатого вала в целом можно предпринять технологические меры, направленные на уменьшение значений наиболее значимых факторов, создающих ступенчатость соседних опор. Это такие факторы, как различия диаметров коренных опор и шеек, значения и направленность их биений, значения и направленность разнотолщинности вкладышей, использование вкладышей разной толщины для компенсаций биения коренных опор при установке вкладышей в постели. Кроме того, для уменьшения различия диаметров коренных опор в одном узле, существуют способы их механической обработки мерным режущим инструментом: режуще-деформирующими протяжками [6, 7], однорезцовыми борштангами на вынесенных опорах [8], развертками и др. Следует отметить практиковавшийся долгое время способ совместной расточки вкладышей в сборе с картером, присвоения им номера постели, разборки и отправки на гальванопокрытие приработочным свинцовистым слоем и последующей сборки по присвоенному номеру. При отсутствии жесткого и точного технологического оборудования для обработки соосных поверхностей коренных опор в картерах и коренных шеек коленчатых валов данное технологическое обеспечение работоспособности подшипников в тяжелых дизелях может оказаться приемлемым. Оно обеспечит повышенные требования к соосным поверхностям подшипников скольжения многоопорных валов, в частности допускам размеров формы и расположения, как к зависимым [9]. Технологическое обеспечение должно включать приемы по применению мерного режущего инструмента на операциях механической обработки коренных опор в картерах, последующее их измерение с применением кон-

Номер звена	Наименование звена	Допуск звена ω_i
1/2	Погрешность формы коренных шеек/опор	0,008/0,022
3/4	Биение средних коренных шеек/опор	0,03/0,03
5/6	Увеличение несоосности коренных опор/шеек	0,020/0,025
7	Разница диаметров коренных опор	0,018
8/9/10	Ступенчатость коренных опор/шеек/вкладышей	0,011/0,011/0,05
11	Изменение коренных шеек от разножесткости	0,052
12	Изменение биения коренных опор	0,02
13	Влияние затяжки вкладышей	0,005

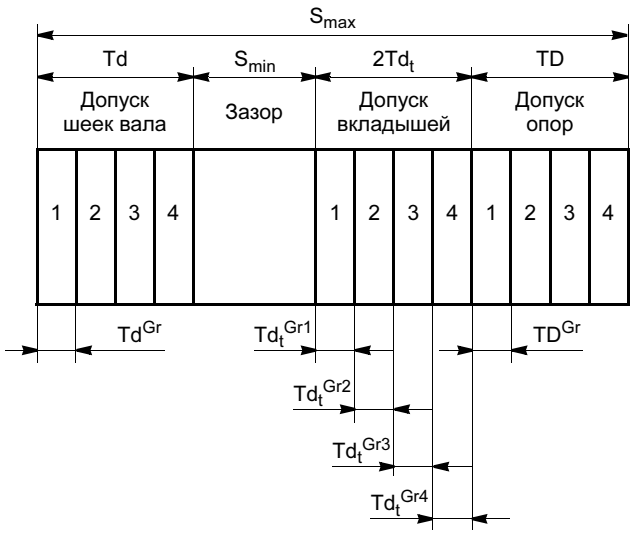
трольно-измерительных операций для выявления величин и направления биений и ступенчатости опор (полуразницы диаметров соседних опор) [4, 5]. Такие данные при сборке подшипниковых узлов можно использовать для компенсации ступенчатости постелей как следствие разницы их диаметров и несоосности.

Комплекс перечисленных мер может способствовать увеличению ресурса работы подшипников тяжелых дизелей за счет повышения гарантированного запаса работоспособности $K_т$ [1]. Приведенный расчет зазора показал, что стандартные допуски деталей многоопорного узла поддержки коленчатого вала (МУПВ) при неблагоприятной направленности векторов погрешностей и их предельных значениях не обеспечивают запаса работоспособности узла и двигателя в целом, поскольку превышают минимально допустимые функциональные зазоры. Этот вывод согласуется с данными работ [10, 11] о превышении действительных допусков деталей двигателей внутреннего сгорания по сравнению с общепринятыми в двигателестроении. В то же время существуют методы повышения точности и, соответственно, работоспособности подшипников качения, например с использованием метода групповой взаимозаменяемости. Возможность применения селективной сборки подшипников скольжения многоопорных подшипниковых узлов (если детали такого узла изготовлены с крайними предельными размерами) позволит сохранять детали для получения качественного МУПВ. Такими деталями являются картер (блок цилиндров), коленчатый вал, вкладыши подшипников скольжения и крышки. Математическое моделирование [12] погрешностей этих деталей с выходным параметром, отражающим изменение действительных зазоров в каждом из соосных подшипников скольжения конкретного сборочного узла, направлено на обеспечение групповой и индивидуальной сборки. Для компенсации излишней величины зазора в одном подшипнике по отношению к другому достаточно компенсировать разницу величин этих зазоров разнотолщинностью вкладышей S_i и S_j [13]:

$$\Delta t = S_i - S_j,$$

где S_i, S_j — толщина i-го верхнего и j-го нижнего вкладышей [13].

Повышение работоспособности МУПВ может быть достигнуто путем выявления лимитирующих величин и направлений биений коренных опор и коленчатого вала собираемого узла на стадии их контроля перед сборкой. Измеренные действительные размеры коренных опор, шеек и толщины вкладышей заносят в базу данных и подбирают в



Сортировка размеров коренных опор, шеек коленчатого вала, верхних и нижних вкладышей по группам

комплект для индивидуальной сборки. Схема групповой сборки МУПВ приведена на рисунке. Сортировка деталей по размерам на группы с более узкими групповыми допусками и сборка их по мере комплектования по одноименным группам [13] с целью оптимизации взаимодействия деталей подвижных соединений [14] автоматизированным подбором [15] условных втулок-подшипников и шеек вала позволит обеспечить оптимальное значение зазоров в подшипниках скольжения при широких допусках на изготовление деталей этого узла в производстве.

При подборе вкладышей подшипников скольжения в собираемый узел при селективной сборке следует учитывать, что по наружной поверхности они собираются с опорами картера по посадке с натягом, а их внутренняя поверхность с коренными шейками должна иметь посадку с зазором, незначительно отличающимся от зазоров других подшипников собранного узла. При сборке вкладыши в силу того, что каждый из них выполнен с выступанием над поверхностью постели, деформируются в окружном направлении, увеличиваясь по толщине, что приводит к уменьшению диаметра образуемого ими отверстия. По данным работы [1] в двигателях ЗМЗ различие диаметров отверстий коренных подшипников может достигать 16 мкм. У дизелей 8 ЧВН 15/16 на диаметре в 2 раза большем эта величина может достигать 5 мкм. При селективной сборке наибольшие зазоры и натяги уменьшаются, а наименьшие увеличиваются [2], что делает зазоры в подшипниках более стабильными, а узел долговечнее. Схемы сортировки деталей на группы для

вкладышей подшипников скольжения могут быть построены по методике работы [2, 16].

Для определения числа селективных групп n вкладышей необходимо знать предельные значения групповых зазоров вкладышей с коренными шейками по внутренней поверхности и верхнего вкладыша с нижним по поверхностям разъема для определения натягов. Их находят из условия обеспечения минимальных и максимальных функциональных зазоров и стабильного изменения толщин вкладышей при сборке картера с крышками (минимальная разница диаметров отверстий подшипников в одном собираемом узле). Таким образом, допускаемое значение групповых допусков TD^{Gr} и Td^{Gr} (см. рисунок) определяются точностью сборки. Работоспособность поверхностей трения подшипников тем выше, чем меньше коэффициент $\varepsilon_н$ равномерности зазоров в одном подшипниковом узле [1]. При этом отклонение формы деталей не должно превышать допуска, а лучше составлять его часть в соответствии с уровнями относительной геометрической точности. В МУПВ дизеля 8 ЧВН 15/16 $TD = Td$ (см. рисунок), поэтому групповой зазор или натяг остается постоянным при переходе из одной селективной группы к другой.

Для повышения долговечности поверхностей трения необходимо создавать наименьший функциональный зазор $S_{\min F}$ [2], а для повышения долговечности соединения вкладышей с коренными опорами и между собой — наибольший допустимый натяг. В соответствии с принципами функциональной взаимозаменяемости, требующими строго выдерживать минимальную толщину масляного слоя $h_{i,\min}$ в каждом i-м подшипнике — опоре ряда соосных МУПВ, следует в новом изделии создать наименьший зазор $S_{\min F}$ (по данным изготовителя дизеля $h_{i,\min} = 3$ мкм; $0{,}07 \leqslant S_{\min F} \leqslant 0{,}12$ мм), а запас на износ при этом составит от 0,3 до 0,24 мм на всех шейках [16]. Если же не ограничить зазоры в новом изделии этими пределами, т. е. работать по действующей методике сборки, основанной на расчете сборочных цепей по методу максимум-минимум, то запас на износ не превысит 0,1 мм.

Данные значения $S_{\min F}$ незначительно расходятся с рекомендациями немецкой фирмы "Глико", специализирующейся на производстве подшипников скольжения, согласно которым зазоры в подшипниках скольжения должны лежать в пределах (0,0008—0,001)d (d — диаметр шейки вала). Для дизеля 8 ЧВН 15/16 рассчитанные по таким рекомендациям зазоры должны иметь значения для коренных подшипников при диаметре коренной шейки $110^{+0{,}035}$ мм в пределах от 0,093 до 0,117 мм.

При групповой сборке в соответствии с заданным $S_{\min F}$ групповой зазор для отдельного подшипника скольжения [5, 16] (см. рисунок)

$$S_{\min}^{Gr} = S_{\min F} + TD_{ув}^{Cr} - \frac{Td}{n},$$

где $TD_{ув}^{Gr}$ — групповой допуск отверстия условной втулки-подшипника [4], равный $\frac{TD}{n} + \frac{2Td_t}{n}$ (Td_t — допуск на толщину вкладыша); n — число сортировочных одноименных групп собираемых деталей при групповой сборке.

По данным работы [5], в подшипниковой промышленности практически $n = 4 \div 5$, поэтому для подшипников скольжения можно принять $n = 4$. Для коренных подшипников 8 ДВТ 330 $TD = Td = 22$ мкм, $Td_t = 25$ мкм, с учетом запаса на погрешности измерения верхнего и нижнего вкладышей при измерении диаметров D, d (см. рисунок) индикаторными головками, а толщины t миниметрами с ценой деления $\Delta = 1$ мкм (и назначении, например, внутренних приемочных границ) получим

$$TD^{GR} = Td^{Gr} = \frac{TD - \Delta_{мет}}{n} = 5 \text{ мкм};$$

$$TD_t^{Gr} = \frac{TD - \Delta_{мет}}{n} = 5 \text{ мкм},$$

где $\Delta_{мет}$ — метрологическая погрешность измерения миниметром с ценой деления 1 мкм при смещении приемочных границ внутрь поля допуска [2], равная 2 мкм.

Значения групповых допусков определяют точность сборки и стабильность $S_{\min}$ и, соответственно, $S_{\min}^{Gr}$. Полученные значения могут быть использованы для расчета лимитирующего зазора в ряду соосных подшипников и выбора компенсирующего значения $\Delta t_к$ верхних и нижних коренных вкладышей из базы данных входного контроля на стадии комплектования сборочного узла по методу групповой сборки [13]. Однако назначение групповой сборки целесообразно проводить, если отклонение от соосности коренных опор $\Delta_{нс} \leqslant 5$ мкм. В противном случае (например, если $\Delta_{нс} \leqslant 30$ мкм) не удастся компенсировать полностью погрешности, варьируя разнотолщинностью при подборе вкладышей в соседних опорах. Чтобы компенсировать всю сумму погрешностей могут потребоваться вкладыши с допуском на толщину $Td_t = 0{,}022$ мм или специальные вкладыши с более широким допуском.

Представленные методы снижения коэффициента $\varepsilon_н$ неравномерности зазоров [1] направлены на улучшение качества, увеличение моторесурса двигателей, в том числе на основе повышения культуры производства за счет использования компьютерной техники, позволяющей применить предложенные способы сборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Назаров А.* Дисбаланс автомобильных и тракторных двигателей / Под ред. К. Н. Муратова. Ашхабад: Ылым, 1981. 252 с.
2. *Якушев А. И., Воронцов Л. Н., Федотов Н. Н.* Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учебник для втузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 352 с.
3. *Санинский В. А., Меньшенин Г. Г., Быков Ю. М.* Определение зазоров в подшипниках скольжения на основе статистической обработки эмпирических данных отклонений толщины их вкладышей // Технология машиностроения. 2005. № 3. С. 39—43.
4. *Санинский В. А., Меньшенин Г. Г.* Определение составляющих полного радиального биения коренных опор и подшипников в картерах дизелей // Автомобильная промышленность. 2000. № 10. С. 29—32, 44.
5. *Санинский В. А., Меньшенин Г. Г.* Определение составляющих радиального биения коренных шеек коленчатых валов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2003. № 12. С. 41—44.
6. *Санинский В. А.* Способ координатного протягивания отверстий // Двигателестроение. 1987. № 10. С. 34—35.
7. *Санинский В. А.* Повышение качества механической обработки соосных поверхностей деталей многоопорных подшипниковых узлов. Волгоград: РПК "Политехник", 2003. 187 с.
8. *Смольников Н. Я., Санинский В. А.* Специальные станки для растачивания глубоких прерывистых отверстий шпинделями на выносных опорах. Волгоград: ВолгГТУ, 2004. 176 с.
9. *Санинский В. А.* Стабилизация масляного клина подшипников скольжения через зависимые допуски его поверхностей контакта / Волгоград: ВолгГТУ, 2001. 19 с.
10. *Тарсис Ю. Л., Захаров С. М., Шорох Е. А.* Совместный расчет коленчатых валов и коренных подшипников ДВС // Двигателестроение. 1989. № 1. С. 20—22, 25.
11. *Баев А. С.* Синтез коленчатых валов с регулярной несоосностью опор // Двигателестроение. 1987. № 3. С. 36—38.
12. *Ивашкин Н. И., Санинский В. А., Светличная В. Б.* Моделирование совместимости коленчатого вала и коренных опор дизеля 8 ЧВН 15/16 // Технология машиностроения. 2004. № 1. С. 25—26.
13. *Санинский В. А., Сторчак Н. А., Сторчак Н. П.* Метод компьютерного моделирования компенсации погрешностей размеров и расположения коренных опор ДВС // Технология машиностроения. 2005. № 5. С. 20—23.
14. *Рыльцев И. К.* Оптимизация взаимодействия деталей подвижных соединений на основе раскрытия взаимосвязи процессов сборки и эксплуатации машин: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара: СамГТУ, 2002. 43 с.
15. *Санинский В. А., Быков Ю. М., Кулешов А. Д.* Определение зазоров в подшипниках скольжения на основе статистической обработки эмпирических данных отклонений толщины их вкладышей // Тракторы и сельскохозяйственные машины. Волгоград, 2004. 176 с.
16. *Санинский В. А.* Групповая идентифицированная сборка вкладышей коренных подшипников скольжения с коренными опорами и коленчатым валом ДВС // Вестник машиностроения. 2006. № 4. С. 31—36.

Реклама Вашей продукции в нашем журнале — один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал "Технология машиностроения" читают руководители и специалисты всех предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в совместных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами в России и странах дальнего и ближнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Наш журнал распространяется только по подписке — это надежная гарантия того, что Ваше рекламное объявление будет прочитано именно специалистом или заинтересованным лицом, т. е. попадет точно в цель.

Наш адрес: 129626, Москва, а/я 01, тел.: (495) 796 2491.

В. Н. ПАНИН, канд. техн. наук
ОАО ИТЦ "Прометей" (г. Чехов Московской обл.)

Особенности сварки гидротехнических конструкций и оборудования

Сооружение гидротехнических объектов, в том числе ГЭС и ГАЭС сопряжено с изготовлением и монтажом большого объема специальных гидротехнических металлических конструкций (ГТМК) и гидромеханического оборудования (ГМО). Общая масса ГТМК и ГМО на этих объектах составляет от десятков до сотен тысяч тонн.

Структурно ГТМК практически на 100, а ГМО на 70—90 % являются по существу сварными конструкциями. При этом сварные соединения являются основными как на стадии изготовления, так и монтажа изделий этих видов. Учитывая специфику работы ГТМК и ГМО, для их изготовления используют, как правило, листовой прокат относительно большой толщины (до 40—80 мм), отсюда объем наплавленного металла достигает 2,0—2,5 % массы изделия. В силу незавершенности протекания физико-химических процессов при формировании сварного соединения и, как следствие, анизотропии механических свойств металла сварного соединения, именно этот объем металла в большей степени определяет работоспособность и надежность конструкции, оборудования и сооружения в целом. По этой причине сварке, как основному технологическому процессу, уделяется особое внимание на всех стадиях создания ГТМК и ГМО, включая проектирование, изготовление и монтаж.

Свариваемость сталей как критерий надежности сварных конструкций и оборудования. Надежность сварных конструкций определяется комплексом факторов [1], начиная от выбора основного металла до методов и условий монтажной сварки и контроля (рис. 1). В настоящее время не существует единого подхода к прогнозированию надежности сварных конструкций от всей совокупности факторов, влияющих на нее. Однако по ряду

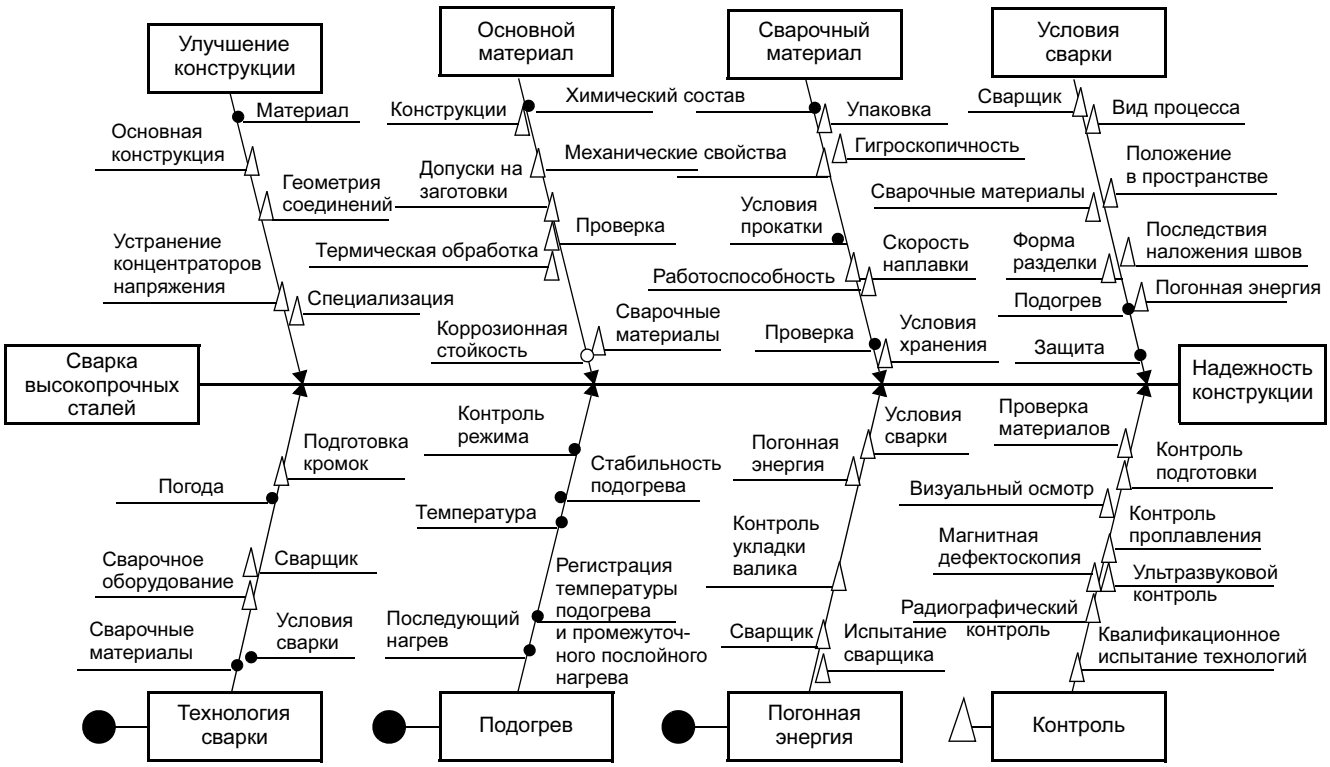


Рис. 1. Схема обеспечения надежности производства высокопрочных стальных конструкций (○, ● — эксплуатационная и технологическая прочность соответственно; Δ — эксплуатационная и технологическая прочность)

интегральных факторов есть очень хорошие корреляционные зависимости, одним из таких факторов является свариваемость сталей.

При изучении свариваемости применяют как экспериментальные, так и расчетно-экспериментальные методы. Первый подход предполагает проведение большого объема испытаний, на основании которых делается вывод об оптимальности сочетаний требуемых параметров режима сварки, применяемых материалов и т. д. Этот подход не оперативен и трудоемок. Второй — предполагает расчетный анализ интересующих параметров с использованием известных либо откорректированных под специфические условия сварки эмпирических зависимостей.

Основным ядром принятой в настоящей работе расчетной схемы является критерий трещинообразования P_c применительно к пробе "Теккен" [2]:

$$P_c = P_{см} + \frac{H}{60} + \frac{\delta}{600}, \qquad (1)$$

где $P_{см}$ — химический эквивалент; H — содержание диффузионного водорода в наплавленном металле; δ — толщина металла.

Дальнейшее исследование условий применяемости критерия трещинообразования P_c и набор определенной статистики позволили расширить область использования данного критерия [3, 4]. С его помощью появилась возможность определения допустимой эквивалентной скорости охлаждения $W_{э.д}$, уже учитывающей толщину металла, содержание водорода в металле шва и химический состав стали. Анализ зависимости скорости охлаждения W от толщины стали и показателя $P_c + \frac{H}{60}$, выполненный численными методами в диапазонах $12 \leqslant \Delta \leqslant 60$ мм и $0{,}2 \leqslant P_{см} + \frac{H}{60} \leqslant 0{,}5$ позволил получить интерполяционную модель

$$W_{э.д} = \xi \exp\left[5{,}637 - 8{,}723\left(P_{см} + \frac{H}{60}\right)\right], \qquad (2)$$

где $\xi = 1$, если $\Delta \leqslant \Delta_к = 6{,}3 + 115\left(P_{см} + \frac{H}{60}\right)$ и $\xi = 1 - 0{,}24\left(\frac{\Delta}{\Delta_к} - 1\right) - 0{,}12\left(\frac{\Delta}{\Delta_к} - 1\right)^2$, если $\Delta > \Delta_к$.

Таким образом, комплексный критерий трещиностойкости позволяет выявить оптимальные условия для сохранения при сварке необходимой технологической прочности по критерию отсутствия холодных трещин как в зоне термического влияния, так и в металле шва.

С другой стороны, отсутствие трещин не гарантирует получения сварного соединения с заданны-

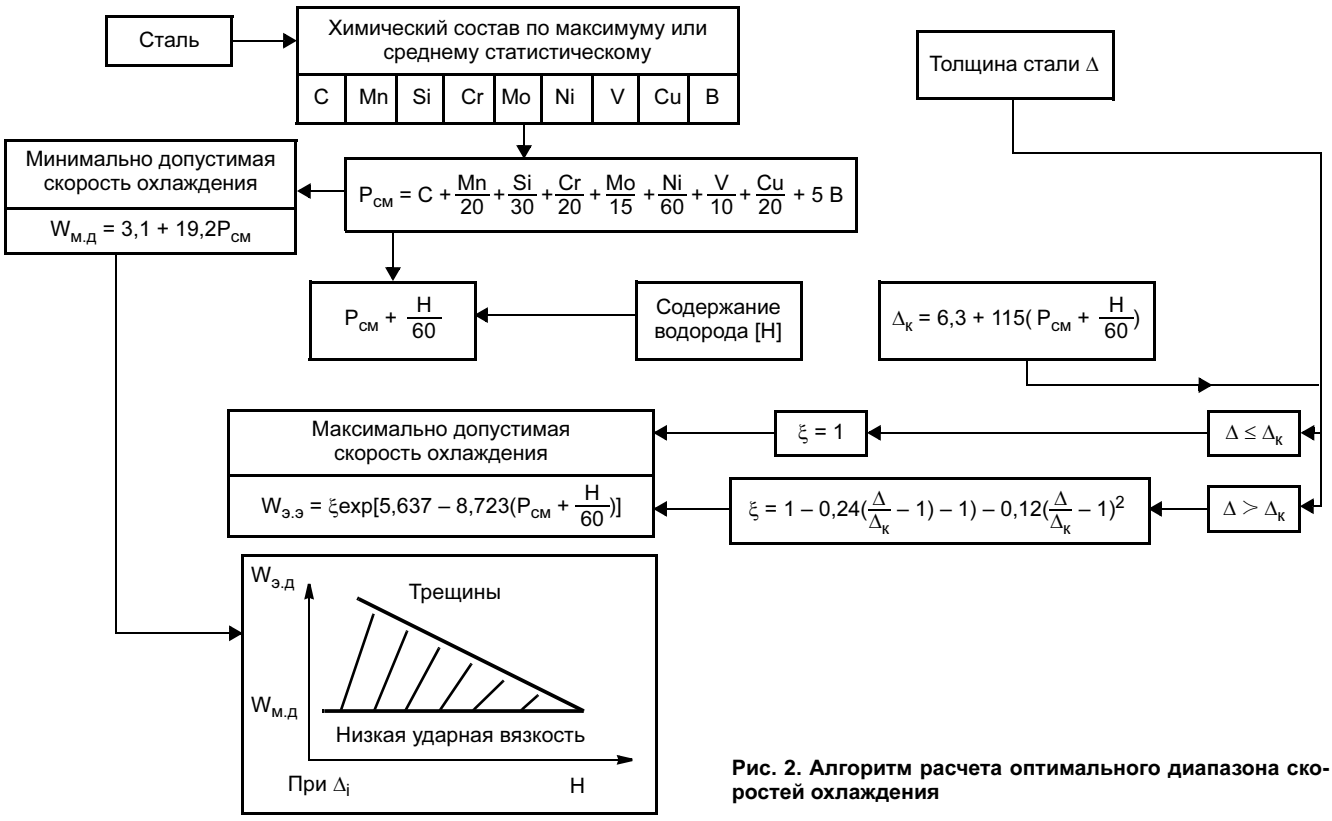


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального диапазона скоростей охлаждения

ми механическими свойствами, в том числе с показателями хрупкой прочности. Последнее особенно важно при сварке с большим тепловложением, например электрошлаковой. В связи с этим был проведен комплекс экспериментальных работ, а также статистический анализ ранее накопленного материала, позволившие установить тесную и значимую связь между минимально допустимой скоростью охлаждения $W_{м.д}$, при которой гарантируется ударная вязкость при температуре –40 °С на уровне требований к основному металлу и показателем $P_{см}$:

$$W_{м.д} = 3{,}1 + 19{,}2P_{см}. \quad (3)$$

Проведенные исследования позволили разработать программу расчета критических скоростей охлаждения, обеспечивающих с одной стороны — отсутствие трещин, с другой — гарантирующих заданные показатели ударной вязкости сварного соединения (рис. 2).

Определенные расчетные критические значения скоростей охлаждения позволяют по известной зависимости $W = f(q/V)$ перейти к критической погонной энергии (q/V), затем к конкретным параметрам режима сварки применительно к заданному химическому составу стали, толщине, виду сварного соединения (рис. 3).

Разработанные методы оценки свариваемости сталей применительно к гидротехническим конструкциям и оборудованию прошли широкую промышленную апробацию и отражены в стандартах предприятия треста "Гидромонтаж". Благодаря использованию этих методов в гидротехнику широко внедрены такие стали как 10ХСНД, 14Х2ГМР, 13ХГМФ, 12ГН2МФАЮ, 16Г2АФ и др. [5, 6]. Турбинные водоводы, коллекторы, затворы, облицовки тоннелей, подъемные краны — вот далеко не полный перечень ГТМК и ГМО, для которых успешно использовали эти стали на Нурекской, Саяно-Шушенской, Чебоксарской ГЭС, ГЭС Малка-Ваканы (Марокко) и др.

Расчетные методы прогнозирования свариваемости сталей применимы для всех способов сварки, используемых в гидротехнике, в том числе ручной дуговой, механизированной и автоматической под флюсом, в защитных газах, электрошлаковой (ЭШС). Однако в общие правила не вписывается электрошлаковая сварка с искусственным стоком теплоты, т. е. электрошлаковая сварка с так называемым спреерным охлаждением. А именно этот способ обеспечивает заданные механические свойства сварных соединений продольных стыков обечаек турбинных водоводов из высокопрочных сталей 14Х2ГМР и МС. Это связано с тем, что искусственный сток теплоты нарушает "жесткость" термического цикла сварки (соотношение времени пребывания выше температуры Ac_3 высокотемпературных

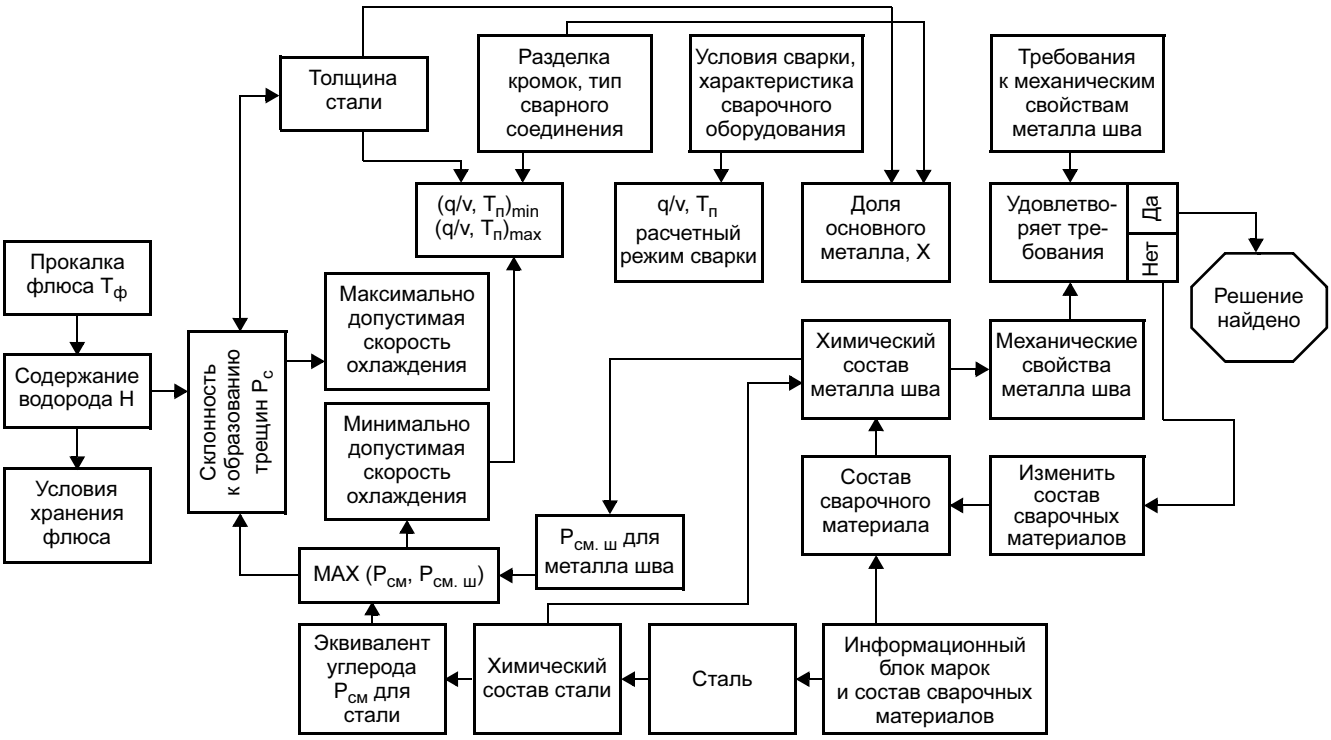


Рис. 3. Алгоритм расчета основных параметров технологии сварки высокопрочной низколегированной стали

фибр околошовной зоны (ОШЗ) на стадиях нагрева и охлаждения), что приводит к отличной от традиционного варианта ЭШС кинетики роста зерна, фазовых превращений и, как следствие, различным механическим свойствам преимущественно ОШЗ по показателю ударной вязкости.

Решение этой задачи осуществлено путем большого объема экспериментальных работ по искусственному регулированию термического цикла сварки, анализа продуктов фазового превращения, получения корреляционных зависимостей мощностей ввода стока энергии и показателей ударной вязкости. Эти работы позволили предложить расчетно-экспериментальную модель прогнозирования ударной вязкости металла шва и ОШЗ в зависимости от переменных факторов, влияющих на этот показатель (рис. 4).

Нестандартизированные конструктивные решения получения сварных соединений. Сооружение ГМО и ГТМК сопряжено в ряде случаев с применением нестандартизированных сварных соединений. В таблице приведены примеры типовых конструктивных решений таких соединений, применяемых в гидротехнике.

Основными причинами принятия таких решений являются технологические особенности конструкций и оборудования, т. е. невозможность в ряде случаев применить стандартизированные соединения, повышение надежности и долговечности сварных соединений; повышение производительности изготовления конструкций и оборудования. Типичным представителем нестандартизированного сварного соединения, принятого по технологическим особенностям, является кольцевой монтажный стык напорного водовода ГЭС (п. 1 таблицы). Основная причина — малое затрубное пространство и, как следствие, монтаж, сварка и дефектоскопия только с внутренней стороны водовода. Разработка соединений по п. 6 таблицы преследовала цель повышения надежности и долговечности соединений. Так, предложенный вариант сварного соединения превышает свой аналог по статической прочности более, чем на 50 % при сохранении долговечности. Кроме того, при использовании этого варианта отпадает необходимость в операции изгиба анкеров за счет повышения сцепления бетона с арматурой периодического профиля. Эти соединения были рекомендованы для применения при изготовлении облицовок водопропускных трактов ГЭС. Цель разработки соединений по п. 2—4 таблицы — снижение трудозатрат и повышение производительности изготовления и монтажа конструкций и оборудования.

Во всех случаях применения тех или иных нестандартизированных конструктивных решений сварных соединений требуется подтверждение их работоспособности как минимум на уровне их стандартизированных аналогов. Чаще всего эту задачу решают экспериментально, т. е. путем сравнительных механических (статических, динамических, малоцикловых — в зависимости от условий работы этих соединений в конструкциях) испытаний либо гостированных образцов, либо натурных соединений.

В ряде случаев для этих же целей применяют расчетно-экспериментальные методы. Так, для обоснования применения

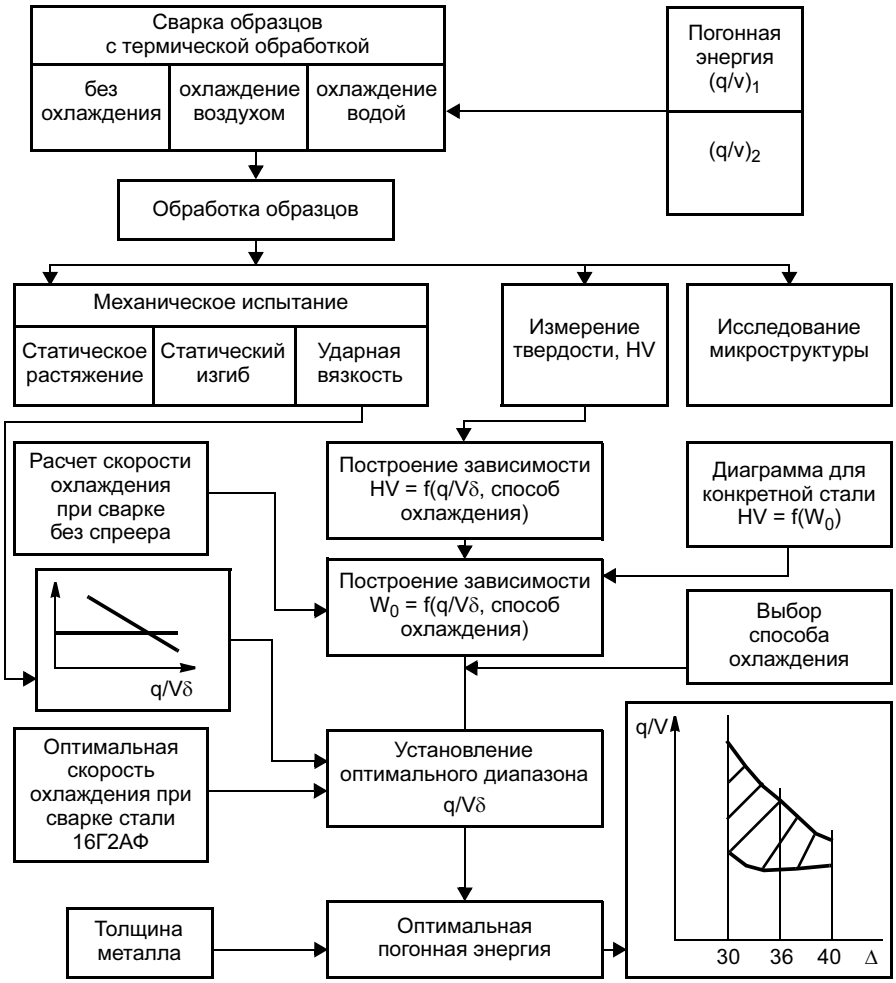
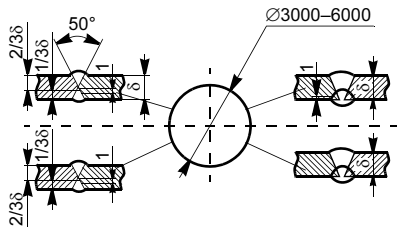
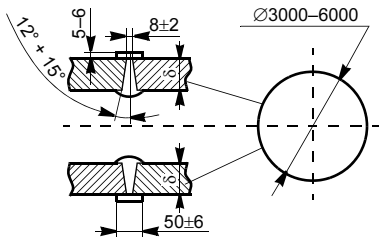
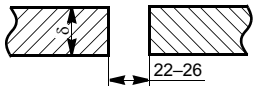
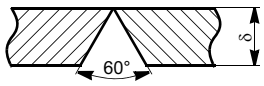
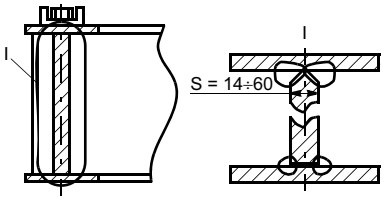
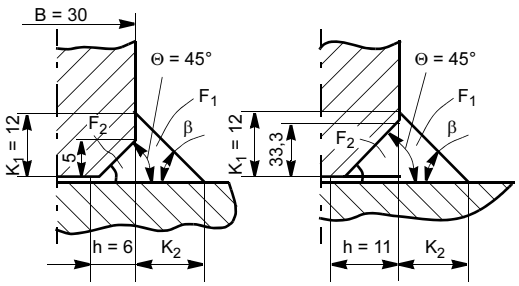
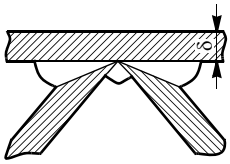
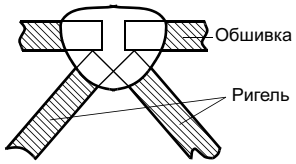
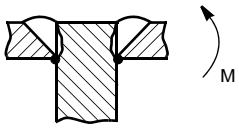
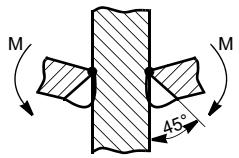
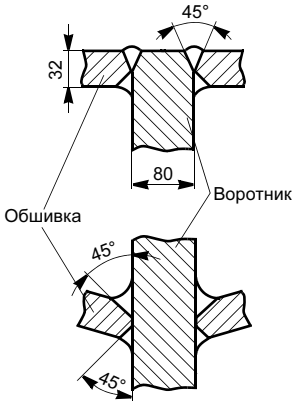
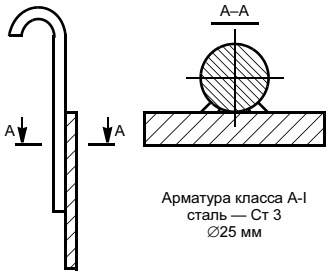
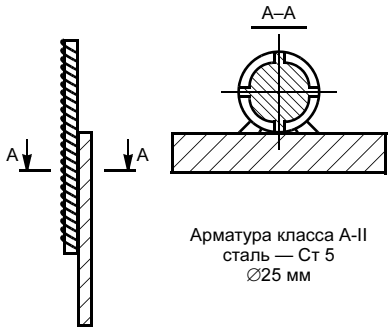


Рис. 4. Алгоритм расчета оптимальных параметров технологии электрошлаковой сварки с искусственным стоком теплоты

Номер варианта	Эскиз сварного соединения		Объект применения
	Стандартизованного	Нестандартизованного	
1			Кольцевой неповоротный монтажный стык турбинного водовода (уменьшенное затрубное пространство)
2			Кольцевой поворотный стык турбинного водовода, выполненного электрошлаковой сваркой
3			Соединение стенки опорно-концевой стойки с обшивкой (плоские затворы водопропускных регулируемых трактов)
4			Соединение ригелей с обшивкой (тоже)
5	 	 49	Соединение обшивки с воротниками (развилки, коллекторы турбинных водоводов)
6			Соединение армостержней с ребрами жесткости облицовок

сварных соединений с технологическим непроваром стенки опорной балки плоского затвора (п. 3 таблицы) использовали известные зависимости [1]

$$\sigma_{ср} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_в\psi\left(\eta + \frac{1}{tg\beta}\right)\frac{\sin\beta}{\sin(\beta+\theta)\sin\theta}; \qquad (4)$$

$$\eta = \frac{h}{\sqrt{2F}}; \quad \psi = \frac{\sqrt{2F}}{\beta}; \quad h = \frac{\beta - l}{2},$$

где $\sigma_{ср}$ — напряжение среза; $\sigma_в$ — предел прочности для однородных механических свойств основного и наплавленного металлов; ψ — относительная площадь сечения наплавленного металла; η — относительная глубина провара присоединенных пластин; β — угол наклона образующего шва; θ — угол направления полосы текучести; h — глубина провара; F — площадь шва; B — толщина металла вертикального элемента; l — длина непровара.

Иначе формулу (1) можно представить в виде $\sigma_{ср} = K_т\sigma_в$ ($K_т$ — коэффициент интенсивности напряжений среза, объединяющий геометрические размеры сварного соединения и отношение величины непровара к сечению шва и толщине свариваемого металла).

В ходе экспериментальных работ эта зависимость была откорректирована под реальные неоднородные свойства основного и наплавленного металла с учетом различной глубины проплавления. Эта зависимость позволила осуществить расчетный прогноз работоспособности подобных сварных соединений по критерию $\sigma_{ср}$, заложить его в стандарт предприятия и использовать при дальнейшем проектировании подобных соединений (рис. 5).

Остаточные сварочные деформации. Локальность термического цикла сварки приводит, как правило, к неравномерному распределению сварочных напряжений как в процессе формирования сварного соединения, так и остаточных напряжений. Эти напряжения в свою очередь обусловливают различный уровень остаточных деформаций сварных конструкций, выходящих в ряде случаев за пределы требований нормативно-технической документации. И в этих случаях единственным средством придания конструкции заданных проектом размеров является, как правило, правка: для простых конструкций — механическая, для более сложных — огневая. Данные операции весьма трудоемкие и дорогостоящие. Кроме того, с их помощью не всегда удается придать конструкции проектные параметры.

Уровень остаточных деформаций зависит от целого ряда конструктивно-технологических параметров и не всегда поддается расчетному прогнозированию с необходимой точностью. Чаще всего прогнозы строят на основе расчетно-экспериментальных методов с использованием известных эмпирических зависимостей с последующей их корректировкой под конкретные условия.

При наличии завершенного проекта прогнозирование остаточных деформаций возможно только за счет технологических параметров (последовательности сварки, способов и режимов сварки и т. д.). При подключении технологов на стадии проектирования арсенал средств регулирования остаточных деформаций резко возрастает за счет возможности изменения конструктивных элементов. Кроме того, при наличии завершенного проекта не всегда удается получить сварную конструкцию в допусках по остаточным деформациям только за счет техноло-

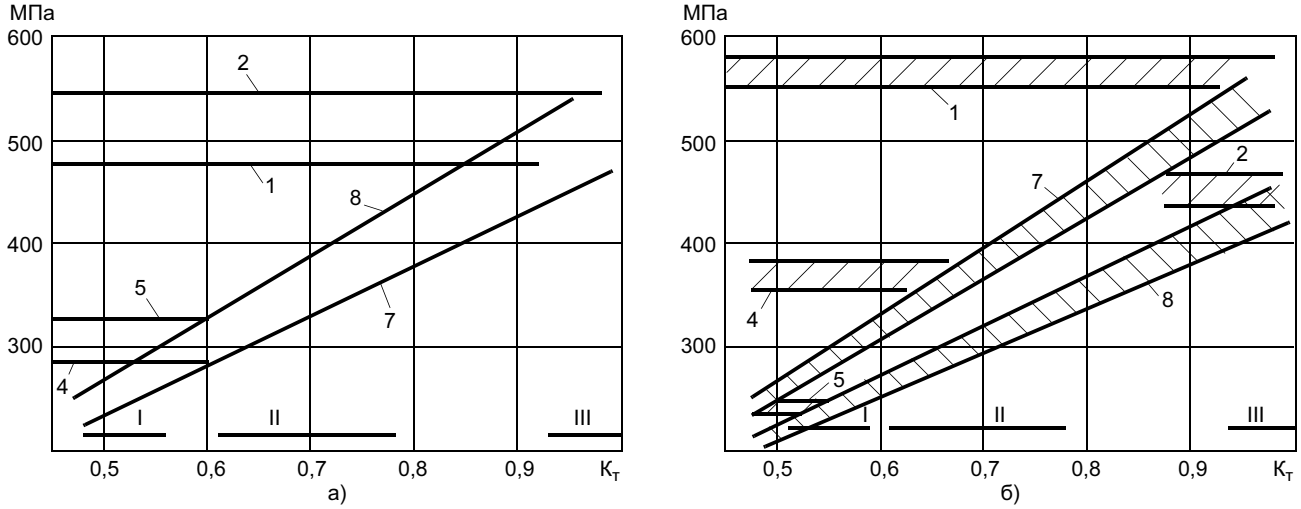


Рис. 5. Зависимость расчетного напряжения среза в сварном тавровом соединении от коэффициента интенсивности срезающий напряжений: *а* — сталь 09Г2С, поволока Св-08Г2С; *б* — Ст3сп, Св-08Г2С (*1*, *2* — предел прочности; *4*, *5* — фактическое напряжение среза; *7*, *8* — расчетное напряжение среза; *1*, *4*, *7* — металл шва; *2*, *5*, *8* — основной металл; I, II, III — скос кромок 0, 5, 10 мм соответственно)

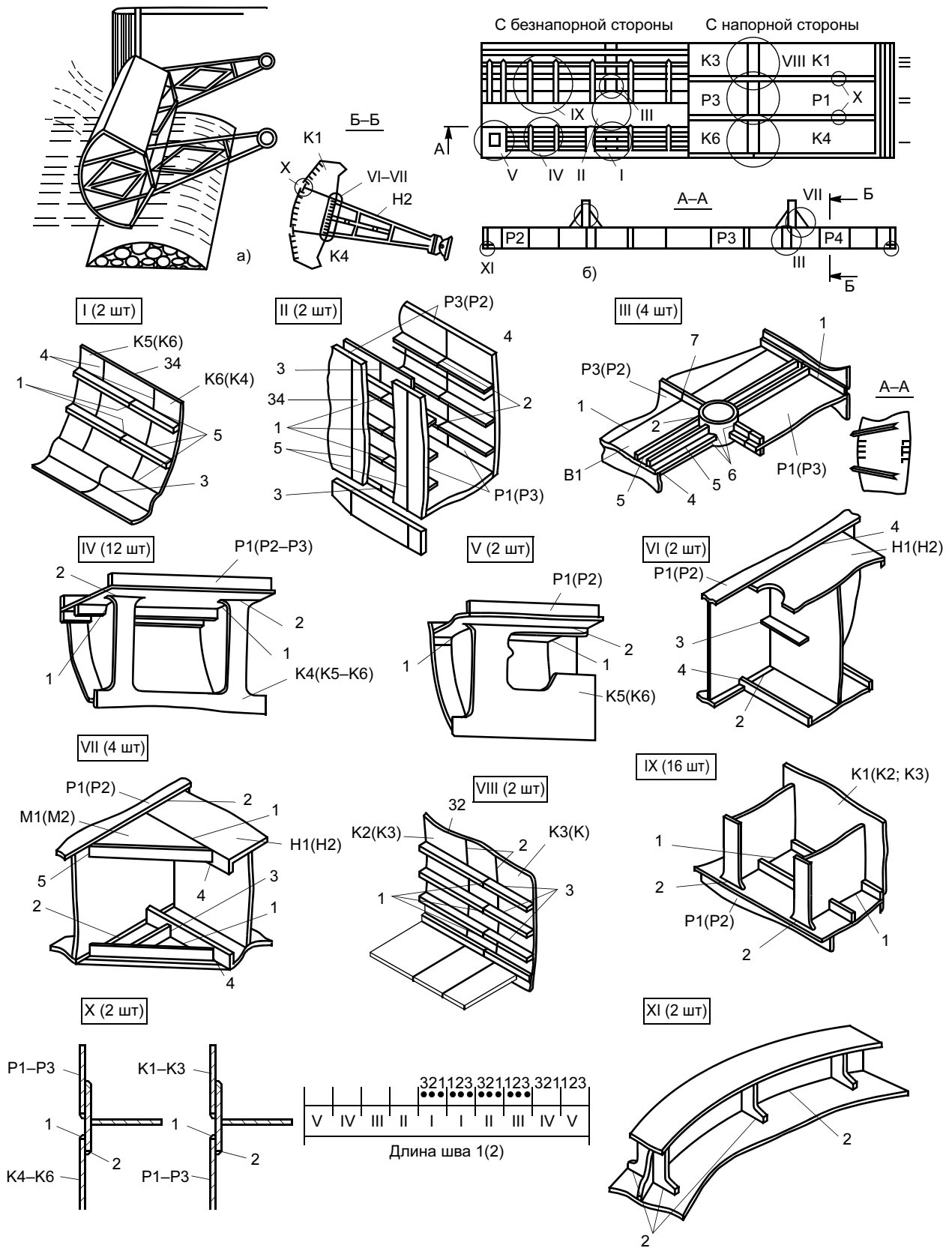


Рис. 6. Последовательность сварки монтажных стыков сегментного затвора: *а* — общий вид; *б* — разбивка на технологические узлы (I—XI — технологические узлы по последовательности сварки; *1—7* — последовательность наложения швов внутри узла; К1—К6; Р1—Р3; В1; М1; М2; Н1; Н2; 32; 34 — монтажные марки затвора)

гических приемов. А это приводит либо к отбраковке конструкции, либо к ее правке.

На примерах типовых конструкций показаны подходы прогнозирования остаточных сварочных деформаций. Регулирование остаточных деформаций за счет оптимизации отдельных технологических параметров (в данном случае последовательности выполнения сварных швов, режимов сварки и т. д.) показан на примере укрупнения сегментного затвора ГЭС (рис. 6). Расчетно-экспериментальный подход на стадии разработки технологии (изделие в конструктивном плане имеет законченный вид) — на примере электрошлаковой сварки продольных стыков обечаек турбинных водоводов ГЭС [7].

На основании исследований с привлечением известных расчетных подходов [8] получена эмпирическая зависимость

$$f = 49{,}2 \cdot 10^{-6} \frac{q_п}{\delta} \left(\frac{L}{R}\right)^{0{,}11}, \qquad (5)$$

где f — прогиб продольного стыка; $q_п$ — погонная энергия сварки; δ, L, R — соответственно толщина, длина, радиус обечайки, позволяющие прогнозировать уровень остаточных деформаций обечаек турбинных водоводов ГЭС с учетом варьирования как технологических параметров, в том числе параметров режима сварки, так и конструктивных, в том числе жесткости конструкции (рис. 7).

Расчетно-экспериментальный подход на стадии проектирования конструкции представлен на примере конструкции облицовки механического оборудования подводящего тракта ГЭС. Результаты этого подхода в виде нового конструктивного решения облицовки приведены на рис. 8.

Технологические особенности заводского изготовления, укрупнения и монтажа ГТМК и ГМО. Технологическая схема изготовления сварных конструкций в заводских условиях состоит из следующих основных этапов: подготовка элементов конструкции (заготовительный этап), сборка конструкции, сварка, поэтапный и финишный контроль, включая неразрушающие методы контроля. В процессе всех этапов в поле зрения сварщиков-технологов находятся поэтапные технологические процессы, материалы и оборудование.

Основной объем заготовительных операций выполняется серийно выпускаемым механическим оборудованием: гильотинными ножницами, пресс-ножницами, вальцами, кромкострогальными станками и т. д. Раскрой листового проката осуществляют в основном с применением плазменных установок портального типа серии "Кристалл", ПКФ и др. Укрупнение листового проката в заготовительном отделении выполняют с помощью автоматической сварки под флюсом автоматами серии АДФ с источником питания серии ВДУ. Этот способ сварки применяют также при изготовлении листовых конструкций и трубопроводов. В последнем случае применяют специальные вращатели либо манипуляторы.

Автоматическую сварку под флюсом в заводских условиях применяют для получения как сты-

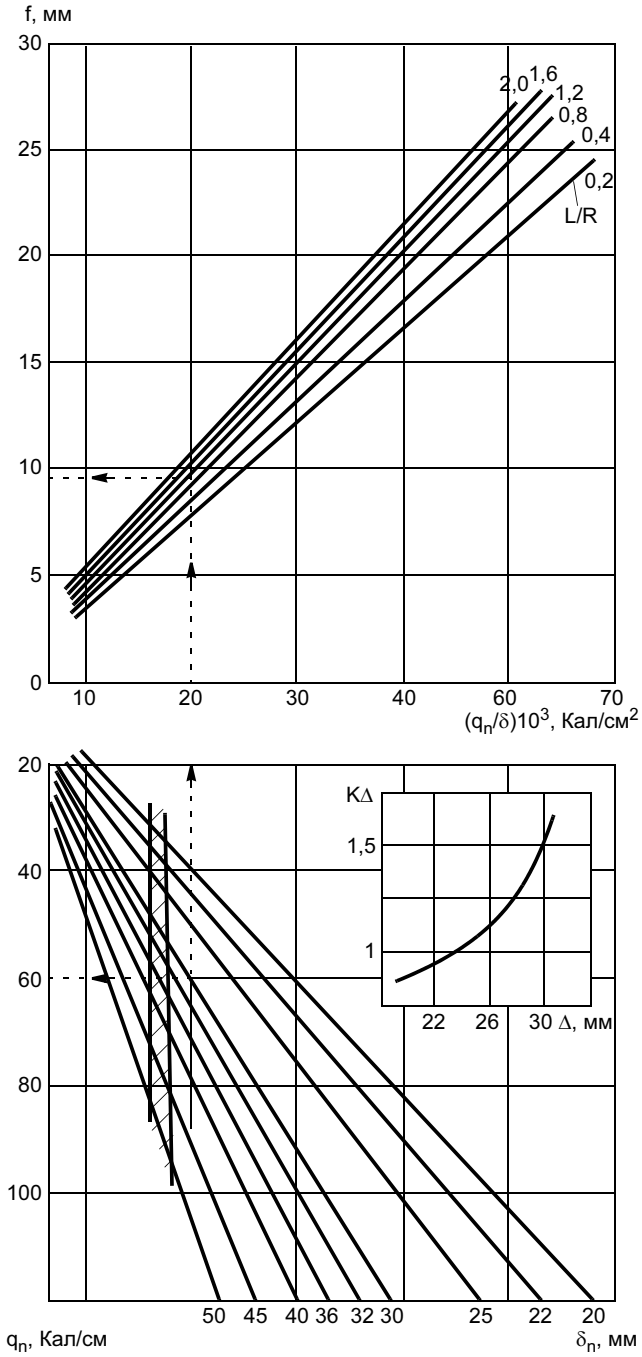


Рис. 7. Номограмма для определения максимальной стрелки прогиба f при электрошлаковой сварке продольного стыка обечайки звена трубопровода

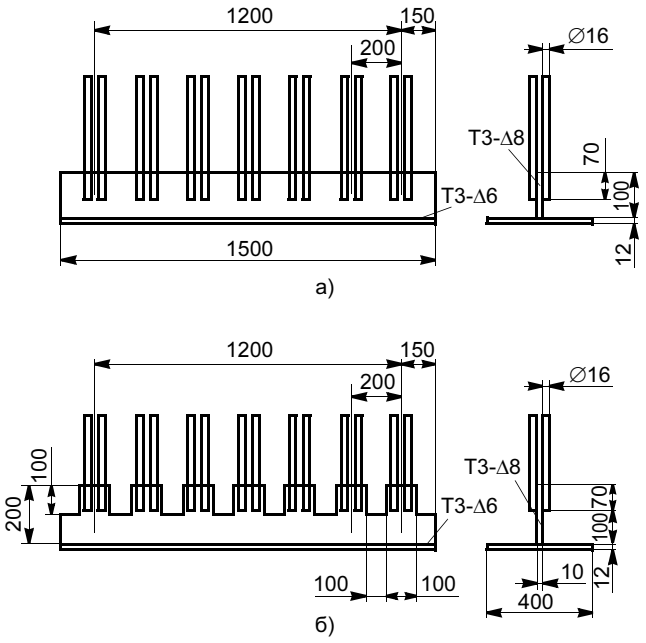


Рис. 8. Фрагменты конструкций облицовок подводящих трактов ГЭС: *а* — типовой конструктивный вариант; *б* — предложенный вариант

ковых (с разделкой и без разделки кромок), так и угловых соединений (в том числе в "лодочку" и угловых). В качестве плавящихся электродов при автоматической сварке применяют сплошные проволоки Св-08А, Св-08ГА, Св-10НМА и др.; для защиты расплавленного металла используют флюсы АН-47, АН-348А, АН-348АМ.

При сварке конструкций типа ортотропных плит, рамного или ферменного типа (например, затворы, опоры, вышки и т. д.) применяют механизированную сварку плавящимся электродом (преимущественно сплошного сечения) в защитных газах (CO_2 или смесь CO_2 и Ar). В качестве плавящего электрода применяют сплошную проволоку Св-08Г2С (реже Св-08ГСМТ или Св-08ГСНТ). Особенностью последних лет является то, что этот материал применяют в упаковках европейского типа, т. е. в кассетах по 15 и 5 кг с рядной и нерядной намоткой, гарантиями по таким параметрам, как дрессура и винтообразность. В качестве сварочного оборудования применяют как отечественные (серии ПДГ с ВДУ), так и импортные (Kemppi, ESAB и др.) полуавтоматы.

Контроль качества металла и сварных соединений неразрушающими методами осуществляют в основном с использованием ультразвуковой дефектоскопии и рентгенографии. При этом применяют в основном отечественное оборудование, аппаратуру и аксессуары. Так, для ультразвуковой дефектоскопии применяют дефектоскопы серии УД, для толщинометрии — УТ, для рентгенографии — рентгеновские аппараты "Рапан", "Арина-05" и др. Аксессуары к этим аппаратам (денситометры, негатоскопы, оптические линейки и т. д.) поставляются по отдельному списку в зависимости от назначения лабораторий.

Одной из особенностей ГТМК и ГМО являются их большие габаритные размеры, не вписывающиеся ни в одну транспортную схему: ни автомобильную, ни железнодорожную. Поэтому сооружение любого объекта ведется по следующей схеме: заводское изготовление элементов (блоков) конструкции или оборудования в пределах железнодорожных габаритных размеров, предмонтажное укрупнение на приобъектном промышленном полигоне и, наконец, монтаж.

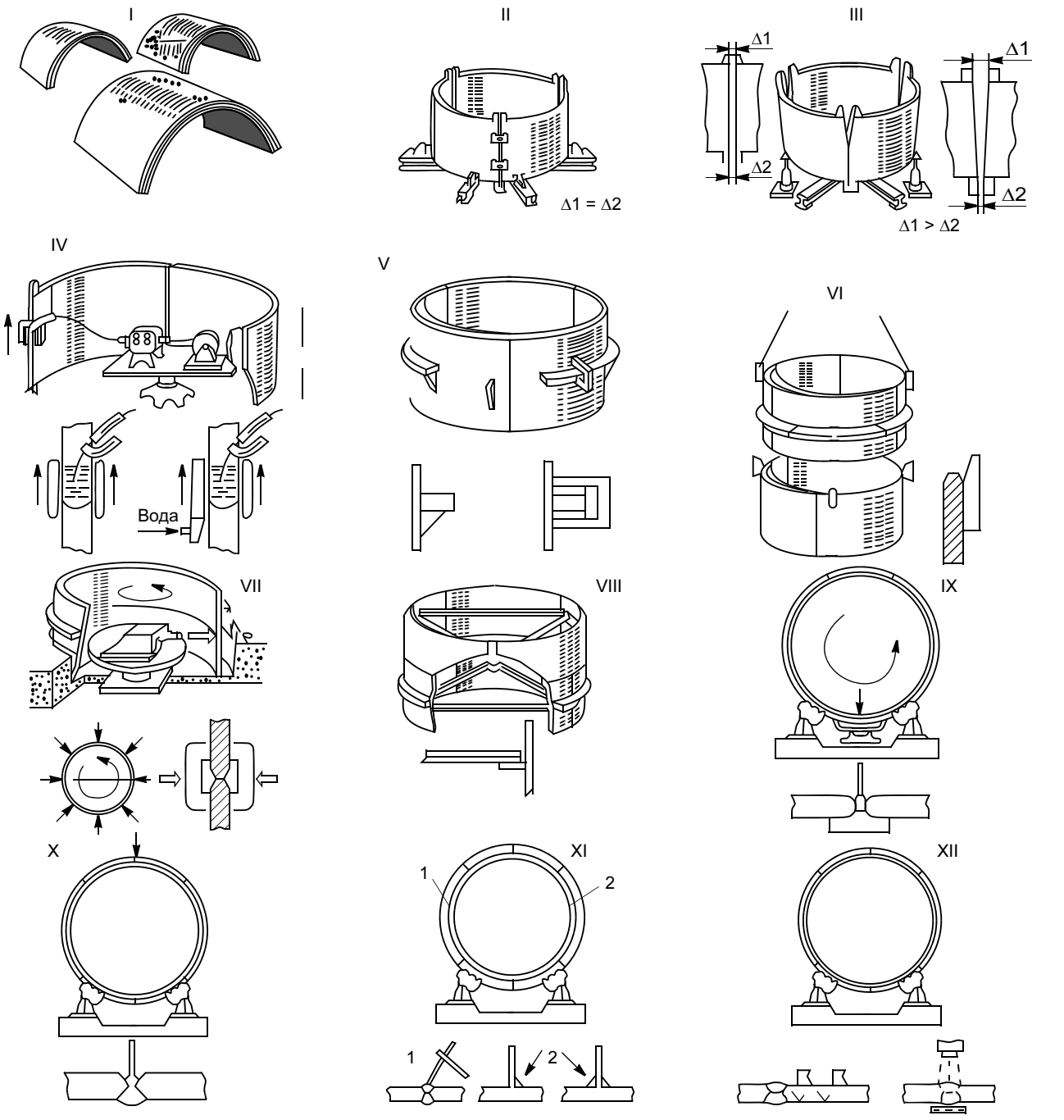
Такая схема предполагает выполнение большого объема сварочных работ непосредственно на приобъектном полигоне и монтаже. В ряде случаев, например, при сооружении негабаритных турбинных водоводов ГЭС практически весь объем сварочных работ выполняют на приобъектном полигоне и в процессе монтажа. Функции завода сведены до функций заготовительного участка.

В связи с тем, что на приобъектном полигоне выполняют сварку ответственных стыков (включая стыки I и II категорий), требуются специальные условия для ее качественного исполнения. К этим условиям относятся разработка специальных технологических процессов сварки и контроля (причем, заводской опыт в этих условиях не всегда приемлем); разработка и создание нестандартизированного технологического оборудования и оснастки; подготовка персонала; возведение цехов и промышленных площадок с необходимыми инженерными коммуникациями. В сущности, создается мини-завод со всеми организационными связями.

На рис. 9 представлен технологический процесс укрупнения турбинных водоводов ГЭС (один из типовых вариантов). Этот процесс является наиболее насыщенным с точки зрения применения автоматизированных способов сварки и контроля, выполняемых в условиях приобъектного полигона.

Так, соединение продольных стыков обечаек осуществляют электрошлаковой сваркой: для обычных сталей — с фиксированным зазором и без спреерного охлаждения, для высокопрочных сталей — с клиновидным "плавающим" зазором и дополнительным спреерным охлаждением. Сварку выполняют на специальных плазах сварочными аппаратами А-820М с источником питания ВДУ 1202. В зависимости от применяемых сталей в качестве сварочных материалов используют проволоки сплошного сечения Св-08ГА, Св-10ГА, Св-10Г, Св-10НМА и флюсы АН-8, АН-22.

Соединение кольцевых звеньев трубопроводов выполняют, как правило, автоматической сваркой



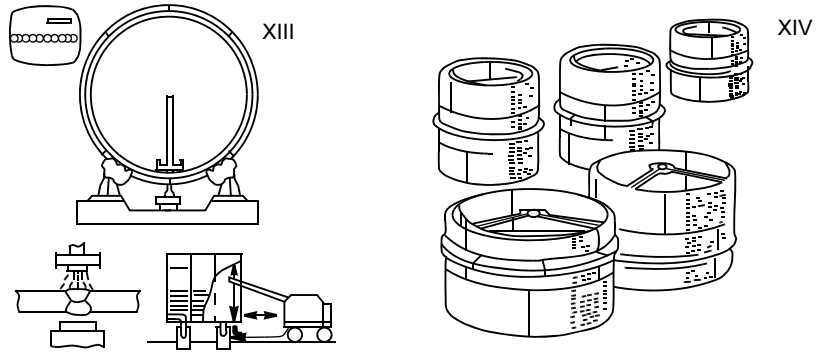


Рис. 9. Последовательность технологических операций при укрупнении звеньев трубопровода с применением электрошлаковой сварки: I — складирование полуфабрикатов (царг); II — сборка обечаек с равномерным зазором; III — то же с клиновидным зазором; IV — сварка продольных стыков; V — сборка ребер жесткости; VI — сборка звеньев с помощью скоб и клиньев; VII — то же с помощью распорного устройства; VIII — установка внутренних раскреплений; IX — сварка кольцевых швов изнутри; X — сварка кольцевых швов снаружи; XI — сварка ребер жесткости; XII — неразрушающий контроль качества сварных швов ультразвуком и радиографическим методом; XIII — то же радиоскопическим методом; XIV — складирование готовых звеньев

под флюсом с применением как серийно выпускаемого сварочного оборудования (сварочные автоматы АДФ 1002 с ВДУ 1202), так и большого спектра нестандартизированного оборудования и оснастки (роликовые, вращатели-стенды (выкатные и стационарные), флюсовые подушки, радиационные и индукционные нагреватели — для сварки высокопрочных сталей и т. д). В качестве сварочных материалов применяют сплошные проволоки Св-08А, Св-08ГА, Св-10Г2, Св-10НМА и флюсы АН-348, АН-47, АНК-30.

Для этих же целей специалистами треста "Гидромонтаж" совместно с ИЭС им. Е. О. Патона разработана и внедрена в производство [9] уникальная технология электрошлаковой сварки, не имеющая аналогов ни в отечественном, ни в зарубежном гидростроительстве (рис. 10). Эта технология позволяет за одни проход в непрерывном режиме выполнить сварку кольцевого поворотного стыка турбинного водовода ГЭС диаметром 6 м с толщиной стенки 40 мм.

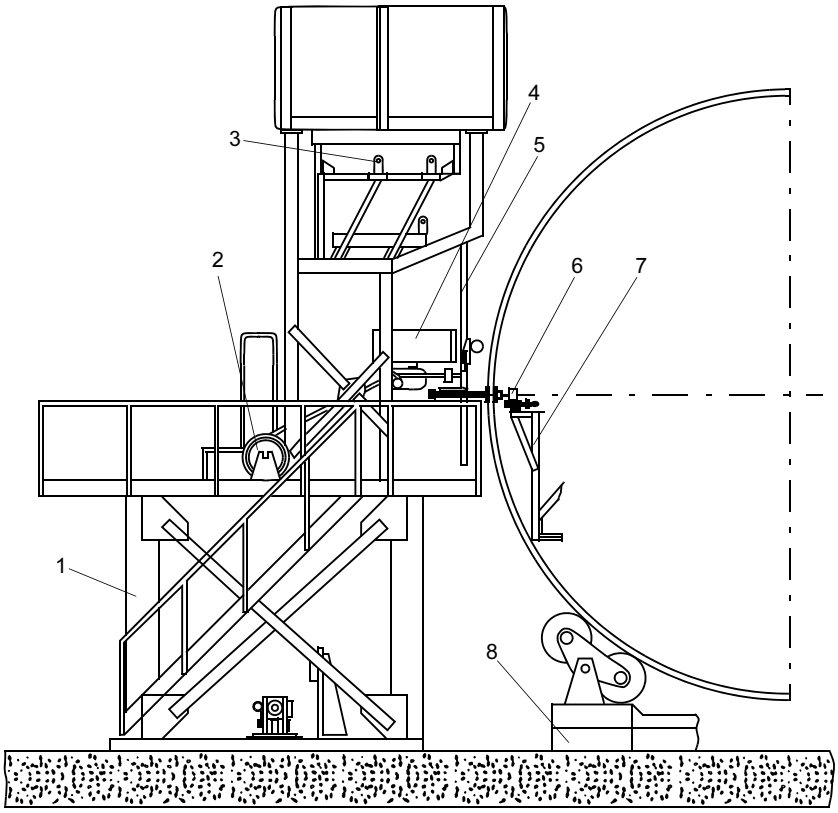


Рис. 10. Установка для электрошлаковой сварки кольцевых поворотных стыков негабаритных трубопроводов: *1* — металлоконструкция; *2* — кассета со сварочной проволокой; *3* — пантограф; *4* — сварочный автомат; *5* — штанга; *6* — прижимное устройство; *7* — консольный мостик; *8* — роликовый стенд

Для сварки стыковых соединений ребер жесткости применяют либо ручную дуговую сварку штучным электродом, либо автоматическую дуговую сварку с принудительным формированием порошковой проволокой. Приварку ребер жесткости к оболочке трубопровода (угловые швы) осуществляют также автоматической сваркой под флюсом.

Контроль качества сварных соединений осуществляют, как правило, неразрушающими методами: ультразвуковой дефектоскопией и рентгенографией. При этом применяют серийно выпускаемое оборудование и аппаратуру: для ультразвуковой дефектоскопии — дефектоскопы серии УД, для рентгенографии — аппараты "РАПАН", "АРИНА", "РУП" и др. Эти технологические процессы контроля весьма трудоемки и малопроизводительны. Кроме того, они требуют большой подготовительной работы: зачистки поверхности околошовной зоны — для ультразвуковой дефектоскопии; установки и фиксации кассет с пленкой — для рентгенографии. Для последнего метода удаление персонала из зоны работ по контролю является обязательным условием.

С целью устранения этих недостатков специалистами треста "Гидромонтаж" совместно с НИИИнтроскопии разработана и внедрена технология автоматического рентгенотелевизионного контроля стыковых соединений турбинных водоводов ГЭС (рис. 11). Эта технология позволяет осуществлять контроль сварных стыков в автоматическом режиме со скоростью 5—10 м/мин с одновременной визуализацией результатов контроля, записью на видеомагнитофон и отметкой на конструкции дефектных мест. Применение этой технологии позво-

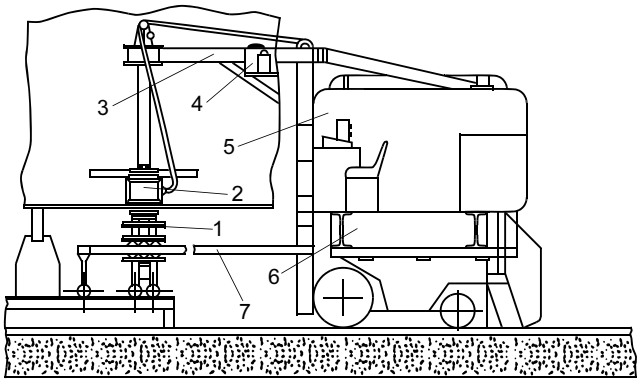


Рис. 11. Установка рентгенотелевизионного контроля сварных швов: *1* — телевизионная камера; *2* — рентгеновская трубка; *3* — верхняя стрела; *4* — генератор аппарата РУП-150/300-1; *5* — кабина; *6* — тележка; *7* — нижняя стрела

лило, с одной стороны, резко сократить время контроля по сравнению с традиционными методами, с другой — благодаря увеличению объема контроля (100%-ный контроль продольных и кольцевых швов) повысить надежность турбинных водоводов и сооружения в целом.

Кроме указанных объектов автоматическую сварку под флюсом широко применяют при укрупнении полотнищ облицовок железобетонных турбинных водоводов ГАЭС (в том числе одностороннюю с обратным формированием корня шва; сварку полов облицовок ряда водопропускных трактов).

Соединение монтажных стыков ГТМК и ГМО осуществляют в основном с использованием ручной дуговой сварки. Это обусловлено рядом обстоятельств: сварку выполняют в основном на открытом воздухе — современные механизированные способы не всегда гарантируют качество сварных соединений в этих условиях; сварку выполняют во всех пространственных положениях — на сегодняшний день нет универсального механизированного способа сварки, обеспечивающего качественное формирование сварного шва во всех пространственных положениях.

В этих условиях особое внимание уделяют подготовке стыков под сварку (зачистка, просушка, при необходимости закрытие от осадков и т. д.), подготовке сварочных материалов (прокалка, просушка по заданным режимам), последовательности наложения сварных швов (блоков, валиков внутри блоков), режимам сварки (ток, напряжение, длина дуги), режиму подогрева (предварительный, сопутствующий, послесварочный — при необходимости). Основные параметры технологии сварки должны быть указаны в технологическом регламенте, являющимся неотъемлемой частью технологической документации.

Армакаркасы гидротехнических сооружений изготовляют либо на приобъектном полигоне (отдельные блоки), либо непосредственно на месте монтажа всего сооружения.

Укрупнение арматурных стержней в непрерывную плеть с последующей разрезкой на нужную длину осуществляют с помощью специализированных технологических линий, в состав которых входят стыковарочные машины МС-2008, К-375, К-190П и др. Линии обеспечивают автоматическую подачу мерных стержней на приводной рольганг и к месту сварки; автоматическую стыковую сварку по заданной программе; снятие грата; резку стержней заданной длины и далее либо складирование (для последующего изготовления армосеток), либо подачу для дальнейшего передела (например изготовление спирали для армокаркасов трубопроводов).

Контроль качества сварки стержней арматуры, выполненных на стыковарочных машинах, осуществляют путем выборочных механических испытаний на разрыв образцов-свидетелей.

Качество сварки ванных стыков проверяют с помощью специальной методики и аппаратуры ультразвуковой дефектоскопией. Этот метод применительно к гидротехническим условиям (арматура большого диаметра до 70 мм) разработан специалистами треста совместно с МГТУ им. Н. Э. Баумана и НИИЖБ [10]. Он основан на корреляционной зависимости между площадью дефектов шва и статической и динамической прочностью стыка. В свою очередь площадь дефекта определяется по степени затухания ультразвукового сигнала в процессе его контроля.

Этот метод благодаря его простоте и мобильности позволяет увеличить объем контроля и, как следствие — надежность всего сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прохоров Н. Н.* Состояние и перспективы развития теории прочности сварных конструкций как основы повышения их качества // Сварочное производство. 1977. № 2. С. 3—8.
2. *Bessiok Ho. Y.* Weldobility Formyla of High Stingth Steels // Dok. IIW—W—576—68.
3. *Касаткин О. Г., Мусяченко В. Ф.* Расчет режимов сварки высокопрочной низколегированной стали // Автоматическая сварка. 1977. № 10. С. 1—6.
4. *Касаткин О. Г., Мусяченко В. Ф.* Разработка информационно-расчетной схемы по технологии сварки // Автоматическая сварка. 1977. № 11. С. 27—31.
5. *Влияние* технологии сварки на закономерности малоциклового деформирования и разрушения стыковых соединений стали 13ХГМФ / В. В. Якубовский, В. В. Волков, В. Н. Панин, М. А. Буранов // Гидротехническое строительство. 1985. № 2.
6. *Панин В. Н., Буранов М. А., Волков В. В.* Технология сварки напорных водоводов ГЭС из высокопрочных сталей МС-9 и МС-10 // Сварочные работы в энергетическом строительстве. М.: Информэнерго, 1981. Вып. 3.
7. *Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Хмарова Л. И.* Влияние геометрических параметров сварных соединений с угловыми швами на их несущую способность и сопротивляемость хрупким разрушениям // Автоматическая сварка. 1986. № 5. С. 1—7.
8. *Кузьминов С. А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Л.: Судостроение, 1974.
9. *Электрошлаковая* сварка кольцевых стыков тонкостенных обечаек большого диаметра / И. И. Сущук-Слюсаренко, В. М. Хрундже, В. Н. Панин и др. // Автоматическая сварка. 1981. № 2. С. 50—53.
10. *Ультразвуковой* контроль качества сварных соединений арматуры периодического профиля / В. Н. Панин, Л. И. Шведов, Е. А. Билев и др. // Сварочные работы в энергетическом строительстве. М.: Информэнерго, 1981. Вып. 3.

Н. В. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук
ОАО "НИАТ"

Получение несплошных износостойких покрытий в вакууме с применением формирующего сепаратора

Технология[1] вакуумного получения несплошных износостойких (карбидов, нитридов, боридов и оксидов переходных металлов) покрытий, разработанная в ОАО "НИАТ", основана на принудительном разделении плазменного потока испаряемого материала с помощью формирующего сепаратора на элементарные струи, формирующие единичные участки покрытия в виде усеченных конусов, шаровых сегментов малой высоты и правильных усеченных трех-, четырех- и шестигранных пирамид (высотой (толщиной)покрытия 3—50 мкм и размерами основания в плане 50—500 мкм), расположенных на поверхности подложки в регулярном порядке с коэффициентом сплошности покрытия ψ (отношение площади поверхности подложки, занятой единичными участками, к общей площади поверхности подложки) в диапазоне 30—70 % [1, 2].

Сепаратор, разделяющий плазменный поток испаряемого материала на элементарные струи, является основным технологическим элементом при нанесении несплошного износостойкого покрытия в вакууме.

Известно, что в электронной промышленности применяются экраны, трафареты и маски для получения топографии микросхем [3]. В машиностроении устройства данного типа применяют для нанесения покрытия слоями, толщина которых изменяется по заданному закону, или для нанесения равнотолщинного покрытия на поверхность сложной кривизны[2]. Часто маски и трафареты применяют для нанесения в вакууме надписей или узоров в декоративных целях[3, 4].

Для устранения мест контакта подложки с державкой изготовляют сетчатые барабаны, внутрь которых загружают подложки[5], а из сеток, пропускающих испаряемый материал, выполняют всевозможные управляющие электроды в системах испарения[6, 7].

Для формирования износостойкого покрытия в вакууме из единичных участков (островков) наиболее простым техническим решением является размещение сепаратора между испарителем и поверхностью подложки или на ней. Однако в научно-технической литературе отсутствует информация о применении подобных подходов для нанесения износостойких покрытий в вакууме. Это обусловлено рядом причин: отсутствием необходимости, довольно высокой температурой процесса осаждения покрытия, неисследованностью процесса взаимодействия сепаратора с ионным потоком и др.

Для осуществления процесса нанесения несплошного износостойкого покрытия в вакууме сепаратор должен удовлетворять следующим требованиям:

— выдерживать многократный нагрев до температуры 500 °С и выше;

— обладать формоустойчивостью без коробления на протяжении процесса напыления;

— обеспечивать проницаемость испаряемого материала в течение всего технологического цикла, заданные форму и размеры единичного участка и топографию покрытия.

Для получения четкой поверхностной структуры несплошного покрытия формообразующий сепаратор должен находиться на поверхности подложки или на расстоянии не более длины свободного пробега атомов испаряемого материала при рабочем вакууме осаждения. Причем электрические потенциалы сепаратора и подложки должны быть одинаковы, т. е. сепаратор следует изготовлять из токопроводящего материала.

Наиболее подходящими материалами для изготовления формирующего сепаратора являются коррозионно-стойкие стали различных марок.

[1] А. с. 1198983 (СССР).
[2] А. с. 351931 (СССР).
[3] Заявка 56-14745 (Япония).
[4] Заявка 1368351 (Великобритания).
[5] Заявка 52-36759 (Япония).
[6] Заявка 1300487 (Великобритания).
[7] Заявка 52-29991 (Япония).

При получении единичных участков несплошного покрытия в виде усеченных конусов, шаровых сегментов малой высоты и правильных усеченных пирамид с тремя или шестью гранями основным элементом формообразующего сепаратора является маска, изготовленная из листовой коррозионно-стойкой стали толщиной не более 0,3 мм. Отверстия в маске имеют форму круга, треугольника или шестиугольника, а их расположение соответствует топографии несплошного покрытия. Другими словами, поверхность маски являет собой отображение "межостровкового" пространства несплошного покрытия.

Требуемые геометрические размеры единичного участка в плане (от 0,05 до 0,5 мм) и значение коэффициента сплошности (от 30 до 70 %) несплошного покрытия значительно усложняют процесс изготовления маски из-за ее ажурности. Перфорация относительно малых отверстий заданной формы в маске с помощью механической, лазерной, электронно-лучевой или других видов обработки металлов представляет собой трудоемкий технологический процесс, связанный с применением координатных столов и последовательным изготовлением каждого отверстия. Это приводит к большой стоимости маски, которая определяется в каждом отдельном случае в зависимости от формы отверстий и расстояния между ними.

При формировании несплошного покрытия из правильных усеченных четырехгранных пирамид в качестве маски можно использовать металлические сетки с квадратными ячейками. Одним из основных производителей таких сеток является ОАО "Солнечногорский завод металлических сеток им. Лепсе".

Стоимость 1 м^2 сетки находится в пределах от 450 до 650 руб., что значительно, примерно на один-два порядка, дешевле масок с перфорированными отверстиями. Следовательно, экономически целесообразно в качестве маски использовать сетки с квадратными ячейками и, как следствие, формировать несплошное износостойкое покрытие из правильных четырехгранных усеченных пирамид.

Таким образом, основным конструктивным элементом формирующего сепаратора является экранирующая маска, изготовленная из металлической сетки с квадратными ячейками в свету. В дальнейшем для простоты изложения и восприятия формирующий сепаратор вполне корректно называть сетчатым экраном.

Анализ ассортимента сеток, выпускаемых Солнечногорским заводом, позволил отобрать 25 типоразмеров сеток, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к геометрическим параметрам несплошных износостойких покрытий, получаемых в вакууме.

К основным техническим характеристикам тканых сеток (см. таблицу) относятся:

— материал проволоки, из которой изготовлена сетка;

— размер квадратной ячейки сетки в свету b, мм;

— диаметр проволоки $d_{пр}$, мм;

— живое сечение (прозрачность) сетки ξ, определяемое как отношение площади пустот сетки к общей площади поверхности сетки, %:

$$\xi = \frac{b^2}{(b + d_{пр})^2} 100\ \%.$$

Данные, приведенные в таблице, наглядно показывают, что при фиксированных изменениях размеров квадратной ячейки в свету от 0,056 до 0,5 мм и диаметра проволоки от 0,03 до 0,3 мм,

Номер по порядку	b, мм	$d_{пр}$, мм	ξ, %	ТУ, ГОСТ, материал
1	0,056	0,040	34,03	Сетка тканая коррозионно-стойкая с квадратными ячейками микронных размеров ТУ 14-4-507—74 Коррозионно-стойкая сталь 03Х18Н9Т-ВИ 12Х18Н10Т
2	0,064	0,032	44,44	
3	0,071	0,030	49,47	
4	0,071	0,055	31,75	
5	0,080	0,055	35,12	
6	0,094	0,055	39,80	
7	0,140	0,090	37,05	
8	0,160	0,120	32,65	
9	0,200	0,130	36,73	
10	0,400	0,150	52,89	Сетка тканая коррозионно-стойкая ГОСТ 3826—82 Коррозионно-стойкая сталь 03Х18Н9Т-ВИ 12Х18Н10Т
11	0,400	0,200	44,44	
12	0,400	0,250	37,86	
13	0,450	0,200	47,93	
14	0,450	0,250	41,33	
15	0,500	0,200	51,02	
16	0,500	0,250	44,44	
17	0,500	0,300	39,06	
18	0,261	0,100	52,27	Коррозионно-стойкая тканая для мельничных комплексов ТУ 14-4-1569—89 Коррозионно-стойкая сталь 03Х18Н9Т-ВИ 12Х18Н10Т
19	0,287	0,100	54,99	
20	0,306	0,110	54,11	
21	0,341	0,110	57,17	
22	0,372	0,120	57,17	
23	0,421	0,120	60,56	
24	0,421	0,130	58,38	
25	0,472	0,130	61,47	

значение живого сечения сетки находится в пределах от 32,65 до 61,47 %.

В первом приближении коэффициент сплошности несплошного покрытия и живое сечение сетки, из которой изготовлен сетчатый экран, должны быть одинаковы. Однако, опираясь на данные работы [4], можно считать, что кривизна проволоки, из которой изготовлена сетка, за счет эффекта "подпыления" влияет на геометрические размеры единичного участка в плане и профиль его поперечного сечения. Площадь основания единичного участка в плане больше площади квадратной ячейки в свету, т. е. ψ больше ξ при плотном прижатии сетки к поверхности осаждения на 14 %.

Выбор типоразмера сетки для изготовления сетчатого экрана зависит от геометрических параметров несплошного износостойкого покрытия, которые, в свою очередь, определяются условиями эксплуатации изделия, упрочненного несплошным износостойким покрытием.

Далее в качестве примера приведено обоснование выбора геометрических параметров несплошного износостойкого покрытия, рекомендованного для применения на режущем инструменте.

Несплошное покрытие на режущем инструменте должно иметь регулярную топографию, т. е. размеры единичных участков в плане должны быть одинаковы, как и расстояние между ними, и гораздо меньше геометрических размеров инструмента, так как разрушаться в процессе резания должны только единичные участки, находящиеся в непосредственном контакте с обрабатываемым материалом.

Известно, что наибольший износ передней грани резца происходит в зоне контакта стружки с поверхностью шириной около 1 мм [5, 6] и в зоне максимальной температуры [7], приблизительно равной половине зоны контакта [6, 8]. Максимальный износ покрытий происходит в тех же зонах [5, 8]. Следовательно, размер единичного участка несплошного покрытия в плане должен быть хотя бы в 2 раза меньше длины контакта стружки, т. е. приблизительно менее 0,5 мм. Только тогда несплошное покрытие должно проявить максимум всех своих положительных качеств по физико-механическим свойствам. Беспредельное уменьшение размеров единичных участков в плане, по-видимому, приведет к значительному усложнению технологии их получения. Поэтому для покрытий на режущем инструменте предлагается использовать размер единичных участков в плане в пределах от 0,1 до 0,4 мм, что гарантирует нахождение нескольких участков покрытия в зонах контакта стружки и максимального нагрева.

Исследование формоустойчивости при нагреве и технологичности изготовления сетчатых экранов для подложек с плоской и цилиндрической поверхностью проводили при использовании сеток трех типоразмеров (см. табл., № 6, 9 и 10).

Определение формоустойчивости при нагреве в вакууме проводили на установке ЭПН-3. Температуру контролировали термопарой группы ХА диаметром 0,2 мм по ГОСТ 6616—61.

Исследования формоустойчивости плоских и цилиндрических экранов, изготовленных из стальных сеток с размерами ячеек в свету 0,094, 0,2 и 0,4 мм, при нагреве до 500 °С в вакууме показали, что экраны выдерживают указанную температуру. Отмечено небольшое провисание (1,5—2,0 мм) у плоского экрана, изготовленного из сетки с размерами ячейки в свету 0,094 мм.

Нагрев сетчатых экранов в установке ЭПН-3 осуществляли с помощью нагревателя излучения резистивного типа. При нагреве плоских и цилиндрических сетчатых экранов до 500 °С с помощью ионного пучка испаряемого титана в установке ННВ6.6.-И1 установлено, что без применения подложек происходит сильное деформирование сеток, а у сетки с размером ячейки в свету 0,094 мм наблюдаются прожоги, что связано с гораздо большей скоростью и энергией нагрева ионным пучком по сравнению с нагревом тепловым излучением.

При нагреве сетчатых экранов, размещенных на поверхности плоских и цилиндрических образцов, отмечено небольшое коробление сеток, что можно объяснить передачей тепловой энергии от сетки к подложке, обладающей гораздо большей массой по сравнению с сеткой.

При исследовании технологичности изготовления установлено, что изготовление плоского сетчатого экрана из сетки с размером ячейки в свету 0,094 мм связано с трудностями из-за непрочности сетки и склонности ее к перекашиванию при натяжении. Изготовление цилиндрических сетчатых экранов из сетки с размером ячейки в свету 0,4 мм связано с трудностями из-за большой жесткости проволоки. Сетка с размерами ячейки в свету 0,2 мм удовлетворительно зарекомендовала себя как при изготовлении плоских сетчатых экранов, так и цилиндрических экранов.

Для изготовления сетчатых экранов, применяемых при нанесении несплошного износостойкого покрытия на режущий инструмент, выбрали тканую сетку 020 (ТУ 14-4-507—74)с размером квадратной ячейки в свету 0,2 × 0,2 мм. Сетка изготовлена из стальной диаметром 0,13 мм проволоки 03Х18Н9Т-ВИ (Х18Н9Т-ВИ) или 03Х18Н10Т-ВИ

(Х18Н10Т-ВИ); химический состав и технические требования соответствуют ТУ 14-1-1702—76.

Рассмотрим геометрические параметры перфорированной ленты, эквивалентной по своим геометрическим параметрам сетке 020 (b = 0,2 мм, $d_{пр}$ = 0,13 мм, ζ = 36,73 %), рекомендованной для формирования несплошных покрытий на режущем инструменте.

Согласно геометрическим расчетам, наиболее технологичный диаметр d цилиндрического отверстия при изготовлении перфорированной ленты должен быть равным 0,226 мм, а расстояние между центрами H отверстий при их плотном расположении — 0,335 мм, при нормальном расположении — 0,331 мм. Наименьшие размеры расстояния между цилиндрическими поверхностями отверстий (размер перемычек) при их плотном и нормальном расположениях соответственно равны 0,129 и 0,105 мм.

Следует отметить, что при плотном расположении отверстий размер перемычек практически равен $d_{пр}$ сетки 020, а при нормальном размещении — шаг размещения отверстий равен шагу размещения ячеек сетки. По аналогии с сеткой 020 толщина b перфорированной ленты должна составлять 65 % размера отверстия и равна 0,147 мм.

Изготовление перфорированной ленты с указанными геометрическими параметрами связано с большими технологическими трудностями.

Использование сетки 020 при нанесении несплошного нитридтитанового покрытия позволило получить покрытие с коэффициентом $\psi \approx 50$ %. Применение данного покрытия на режущем инструменте показало, что при точении несплошное покрытие разрушается в зоне единичного участка и позволяет по сравнению со сплошным значительно снизить силы резания и шероховатость обработанной поверхности, обеспечивая при этом в зависимости от вида механической обработки и обрабатываемых и инструментальных материалов в 1,5—6,0 раз большую стойкость режущего инструмента [9].

На основании вышеизложенного рекомендуется несплошные износостойкие вакуумные покрытия формировать из правильных усеченных четырехгранных пирамид, а в качестве задающего элемента в сепараторе, формирующем покрытие, использовать тканые стальные сетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матвеев Н. В.* Форма и геометрические размеры единичного участка в несплошном износостойком вакуумном покрытии // Авиакосмическая техника и технология. 2002. № 2. С. 13—15.
2. *Матвеев Н. В.* Топография вакуумных несплошных износостойких покрытий // Авиакосмическая техника и технология. 2004. № 4. С. 23—27.
3. *Данилин Б. С.* Получение тонкопленочных элементов микросхем. М.: Металлургия, 1977. 135 с.
4. *Матвеев Н. В.* Вакуумное формирование несплошных износостойких покрытий на плоской подложке // Авиакосмическая техника и технология. 2003. № 4. С. 15—20.
5. *Мацевитый В. М., Козак И. В.* Основные функции износостойких покрытий при резании. Харьков: ХПИ, 1984. УкрНИИНТИ. Деп. № 1527—84.
6. *Макаров А. Д.* Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
7. *О влиянии* нитридтитановых покрытий на локализацию температурного поля при трении / В. М. Мацевитый, В. М. Береснев, М. С. Борушко и др. // Трение и износ. 1981. Т. 2. № 6. С. 118—120.
8. *Мацевитый В. М., Козак И. Б., Романова Л. М.* Механизм влияния износостойких покрытий на температуру рабочих поверхностей режущего инструмента. Харьков: ХПИ, 1984. УкрНИИНТИ. Деп. № 1526—84.
9. *Матвеев Н. В.* Служебные и физико-механические свойства несплошного нитридтитанового покрытия // Технология машиностроения. 2004. № 2. С. 29—34.

И. Ф. ЧЕБУРАХИН, д-р техн. наук, И. В. ДУБОГРАЙ, аспирант, С. В. КОБЗЕВ, аспирант, В. С. НЕДОБОЙ, аспирант
"МАТИ"–РГТУ им. К. Э. Циолковского

Высокие технологии при проектировании интегральных схем

Введение. Элементы логико-математического языка

Проблемы синтеза дискретных вычислительных и управляющих устройств — цифровых автоматов на основе интегральных схем (ИС) различной степени интеграции могут еще долго оставаться нерешенными. Объяснить это можно разными причинами, в том числе и тем, что ИС, обладающие уже широким диапазоном номенклатуры, продолжают дальше интенсивно совершенствоваться. Некоторые из этих проблем сводятся к проблемам реализации булевых функций формулами (в функциональном базисе) и цифровыми интегральными схемами (в соответствующем базисе элементарных ИС), так как в конечном виде именно булевы функции являются математическими моделями функционирования этих устройств. В теории булевых функций имеется еще ряд нерешенных проблем, например, относящихся к проблематике сложности или оптимальной реализации (по различным показателям качества) булевых функций в разных базисах. Поэтому актуально и полезно пополнять базу знаний, используемую для разработки интеллектуальных систем синтеза ИС.

Математика является не только совокупностью фактов и методов, но и языком для описания фактов и методов различных научных и производственных областей человеческой деятельности. Этот язык служит "рабочим аппаратом — инструментом" для решения различных задач. В нем можно выделить две составляющие: собственно математический язык — термины и символы, служащие для получения математических моделей (описания объектов и отношений), и логический язык (логические термины и символы), одно из назначений которого заключается в получении из исходных, истинных утверждений новых утверждений, не противоречащих действительности. Это назначение логического языка расширяет возможности самой математики и придает ей некоторый динамизм.

К вопросу об эволюции математического языка связь словесного и логического языков рассмотрим на следующем примере. Проводя различные рассуждения, используем союзы "и", "или" (исключающее и неисключающее), частицу "не", словосочетания "если, то...", "тогда и только тогда". Если при этом их смысл и назначение сохраняем, используя их символические аналоги &, $\vee$, $\oplus$ и ~, то, соблюдая при этом определенные правила, приходим к математической логике. И уже булевы (логические) функции могут выступать в качестве математических моделей для управляющих устройств. В подтверждение этого рассмотрим следующий пример о лифте.

Пример 1. Задача о вызове свободного лифта. В подъезде n-этажного дома работают три лифта. На каждом этаже имеется устройство, которое при нажатии кнопки позволяет вызывать ближайший свободный лифт. На логическом языке записать условие вызова i-го лифта, i = 1, 2, 3. Рассмотрим решение задачи для случая вызова лифта на первый этаж [1].

Для описания исходного или рабочего (текущего) расположения лифтов введем $3n$ переменных $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, ..., x_n, y_n, z_n$, где $x_i = 1$ в том и только том случае, когда первый лифт находится на i-м этаже и свободен; $y_i = 1$ в том и только том случае, когда второй лифт находится на i-м этаже и свободен; $z_i = 1$ в том и только том случае, когда третий лифт находится на i-м этаже и свободен.

Обозначим через $f_1(x_1, y_1, z_1, ..., x_n, y_n, z_n)$, $f_2(x_1, y_1, z_1, ..., x_n, y_n, z_n)$, $f_3(x_1, y_1, z_1, ..., x_n, y_n, z_n)$ функции, равные 1 в том и только том случае, когда вызывается лифт с номером соответственно 1, 2, 3. Условие вызова первого лифта, т. е. характеристика функции f_1, есть то, что "первый лифт свободен и нет свободных лифтов, расположенных на более низком этаже, чем первый лифт".

$$f_1(x_1, y_1, z_1, ..., x_n, y_n, z_n) = (x_1 \vee (\bar{y}_1 \ \& \ \bar{z}_1 \ \&$$

$$\& \ ((x_2 \vee (\bar{y}_2 \ \& \ \bar{z}_2 \ \& \ (x_3 \vee (\bar{y}_3 \ \& \ \bar{z}_3 \ \& \ (...)))))))).$$

Аналогично получаем формулы для других функций. Они могут быть заданы соответствующими таблицами, но полученные формулы бесповторные, что для аппаратной реализации эффективнее по различным показателям (числу логических элементов, надежности и др.).

Основные понятия и определения. Проблема сложности синтеза комбинационных автоматов

Под базисом, обозначаемым символом G, понимается произвольная конечная полная система булевых функций. Для функций из классов &, $\vee$, $\oplus$ и ~,

а также других классов, считаем, что базисная функция $g \in G$ может принадлежать как тому же классу, что и реализуемая функция f, так и другому. Это зависит от решаемых задач. Рассмотрим базисы и множества функциональных символов (ФС):

$$G_1 = \{\&, \vee^{-}\}, \quad G_2 = \{\&, \vee\}, \quad G_3 = \{\&, \oplus, 1\};$$

$$G_4 = \{g^{(n')} \mid g^{(n')} \text{ — бесповторная формула над } G_1 \text{ строения } r\text{, аргумент } n'\}, \qquad (1)$$

$$G_5 = \{g^{(n')} \mid g^{(n')} \text{ — бесповторная формула над } G_3 \text{ строения } r\text{, аргумент } n'\}.$$

Символом G_o обозначим множество базисных функций $\{\&, \vee, \oplus, \sim\}$, обладающих одинаковыми алгебраическими свойствами коммутативности и ассоциативности, и с этих позиций (для определенных задач) можно рассматривать в качестве базисной любую из них.

Обобщим множества-базисы G_i, $i = 0, 1, ..., 5$, добавляя в них базисные функции, а в обозначение — второй индекс j, роль которого выяснится ниже по тексту, и, получая G_{ij} при $j = 0$, получим G_i, т. е. $G_{io} = G_i$.

Под сложностью булевой формулы можно понимать число букв в записи формулы, число ее базисных подформул или глубину формулы и др. Под сложностью булевой функции в классе формул будем понимать какой-либо показатель сложности формулы; схем — из функциональных элементов (ФЭ) — число ФЭ или транзисторов, глубину схемы и др. В рассматриваемой предметной области часто под сложностью булевой функции в данном функциональном базисе понимают сложность в отношении числа букв в реализующей ее формуле и называют наименьшую сложность формулы в том же базисе среди всех таких формул, которые реализуют эту функцию.

Основой для решения этих проблем является поиск для различных базисов оптимального по сложности (не только по числу букв, но и по числу подформул, по глубине формулы и др.) представления булевой функции $f^{(n)}$ (функции f, зависящей от n переменных) суперпозиционной формулой F, получаемого на основе декомпозиции в базисе G. В качестве сложности рассматривают соответствующие функционалы — показатели качества представления булевой функции $f^{(n)}$ формулой F способом w (способ состоит из упорядоченного набора конструктивных операций из их некоторого множества):

$L_Б(f^{(n)}, G)$ — суммарное число вхождений символов переменных в формулу F, реализующую функцию $f^{(n)}$ в базисе G;

$L_{от}$ — число отрицаний в формуле;

$L_{лоп}$ — число логических операций, причем $L_{лоп} = L_{от} + L_Б - 1$;

$$L_K(f^{(n)}, G) \text{ или } m \text{ — длина формулы } F; \qquad (2)$$

$L_F(f, G, w)$ — число подформул в формуле F;

$Dep_F(f, G, w)$ — глубина формулы F. Для этих показателей будем использовать обозначения L_F, Dep_F и $L_Б$ или другие на их основе.

Тогда сложностью $L_Б$, L_F и Dep_F булевой функции $f^{(n)}$ относительно соответствующего показателя в базисе G называют наименьшую из сложностей формул в базисе G, реализующих функцию $f^{(n)}$. При этом число $Dep_F(f, G, w)$ чаще называют глубиной функции $f^{(n)}$ в базисе G, т. е. глубиной $Dep_F(f, G)$ булевой функции $f^{(n)}$ в базисе G называют глубину такой формулы F в базисе G, которая реализует функцию $f^{(n)}$ и имеет наименьшее значение (в этом определении способ оговаривается неявно).

$L_S(f, g, w)$ — число функциональных элементов в схеме S;

$Dep_S(f, g, w)$ — глубина схемы S, определяемая как наибольшее число функциональных элементов в цепочке, среди всех цепочек, соединяющих вход с выходом, где $g = \langle g_{i_1}, ..., g_{i_s} \rangle$, $g_{i_j} \in G$ и $w = \langle w_{i_1}, ..., w_{i_s} \rangle$, $w_{i_j} \in W$.

В работе [2] рассматривается функция $x_1 \oplus x_2$ в разных базисах и отмечается, что в них она имеет разную сложность (по показателю $L_Б$). Поэтому представляют интерес вопросы:

— для каких базисов и каких способов они (показатели сложности функции) все принимают наименьшие значения (или получение областей для наименьших значений по одному показателю);

— во сколько раз может измениться сложность $L_Б(f^{(n)}, G)$ функции $f^{(n)}$ при переходе из базиса G_1 в базис G_3, будет ли это отношение ограничено сверху некоторой константой, зависящей от пары базисов, или же будет неограниченным [2—6]. В работе [3] показано, что сложность почти всех булевых функций асимптотически не зависит от базиса, и перед Б. А. Субботовской была поставлена задача сравнения базисов в общем виде.

Определение 1. Базис G предшествует (или не хуже) базиса G', если отношение сложности произвольной функции в базисе G к сложности этой же функции в базисе G' не больше некоторой константы, зависящей только от базисов G и G'.

Определение 2. Базисы G и G' называются эквивалентными, если они предшествуют друг другу.

Теперь задачи сравнения базисов состоят в следующем [2, 3]:

— для произвольной пары базисов G и G' определить, предшествует ли базис G базису G' или нет;

— описать структуры базисов (т. е. структуры отношения предшествования) с точностью до эквивалентности.

В решении проблемы сравнения булевых базисов значительные результаты получили О. Б. Лупанов (сформулирован признак сравнения базисов, на основе которого было получено полное описа-

ние структуры двуместных базисов), Б. А. Субботовская (получен критерий эквивалентности произвольного базиса базису G_1), а также Б. А. Мучник, В. А. Стеценко, Д. Ю. Черухин и др., но тем не менее полного описания структуры базисов не получено [2].

Частичный порядок на множестве базисов

Пусть G конечное полное множество различной местности функциональных символов (ФС), причем им сопоставляется и некоторое строение, например, ФС соответствует бесповторной дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) и тогда строение ФС — вектор рангов, т. е. можно считать, что G есть множество строений бесповторных функций.

Из ФС это могут быть нульместные функции константы 0 и 1, одноместная функция отрицание, ФС различной местности конъюнкции, дизъюнкции, сложения по модулю 2 и эквивалентности, а также бесповторные ДНФ и полиномы Жегалкина и др. Из элементов множества G образуем, например, конечную последовательность

$$G^{(1)} = \{g_0^{(0)}, g_1^{(0)}, g_\neg^1, g_\&^{(2)}, g_\oplus^{(2)}, g_\vee^{(2)}, g_\sim^{(2)}\}, \ldots, G^{(i)} = \\ = \{g_0^{(0)}, g_1^{(0)}, g_\neg^1, g_\&^{(ni1)}, g_\oplus^{(ni2)}, g_\vee^{(ni3)}, g_{\&\vee}^{(ni)}, \ldots, \\ g_{\&\oplus}^{(ni)}\}, \ldots, G^{(k)} \qquad (3)$$

множеств ФС, линейно упорядоченных отношением *предшествования* (на основе следующего определения 3).

Определение 3. Множество $G^{(i)}$ *предшествует* (*не сложнее*) множеству $G^{(j)}$ (обозначение $G^{(i)} \leqslant G^{(j)}$, при этом $i < j$), если для каждого ФС из $G^{(i)}$ существует ФС в $G^{(j)}$, находящийся с первым в отношении *не проще*.

Определение 4. Множества $G^{(i)}$ и $G^{(j)}$ называются эквивалентными, если каждое из них *предшествует* другому.

Определение 5. Множество $G^{(i)}$ *строго предшествует* (проще) множеству $G^{(j)}$ (обозначение $G^{(i)} < G^{(j)}$), если оно *предшествует* множеству $G^{(j)}$, причем, или хотя бы для одного ФС из $G^{(i)}$ существует ФС в $G^{(j)}$, находящийся с первым в отношении *сложнее*, или множество $G^{(j)}$ содержит ФС, не находящийся в отношении *сравнения* с ФС из $G^{(i)}$.

Считаем, что последовательность (3) порождается множеством — базисом $G^{(1)}$. В качестве $G^{(1)}$ может быть принят любой из ранее определенных базисов G_1—G_5, определенные там вторые индексы означают номер члена последовательности.

Сравнение формул на основе строения [7, 8] переносится на сравнение ФС с сопоставленными им строениями, например $f_\&^{(2)} < f_\&^{(3)}$.

Тогда при соблюдении требований оптимизации (исходя из решения задач на основе параллельной декомпозиции) из $G = G^{(1)} < G^{(2)} < \ldots < G^{(k)}$ следует

$$Dep_{F0}(f^{(n)}, G) = Dep_{F1}(f^{(n)}, G^{(1)}) \geqslant \ldots \geqslant \\ \geqslant Dep_{Fk}(f^{(n)}, G^{(k)}) \text{ и} \qquad (4)$$
$$L_{F0}(f^{(n)}, G) = L_{F1}(f^{(n)}, G^{(1)}) \geqslant \ldots \geqslant L_{Fk}(f^{(n)}, G^{(k)}).$$

Выбирая определенные последовательности (2), (3), можно улучшать оценки (4) сложности представления булевых функций в различных базисах. Требования к элементам последовательности $G^{(1)}, \ldots, G^{(k)}$ можно существенно упрощать и элементы последовательности расширять, пополнять новыми базисными элементами.

Конструктивные операции

Из конструктивных операций отметим те, которые непосредственно используются при приведении данной формулы f или остаточной к одному строению с канонической базисной формулой g, т. е. при декомпозиции: перестановка элементарных конъюнкций (дизъюнкций) в формуле, а в ней переменных; замена подформулы новой переменной; переименование и отождествление в базисной формуле переменных; подстановка в формуле констант вместо переменных; вынесение общих множителей за скобки и обратные им операции, а также использование конструктивных операций на основе эквивалентностей булевой алгебры. Эти конструктивные операции выполняются на основе математико-информационного описания булевых формул, и они реализуемы в ЭВМ [7].

Алгоритмы синтеза формул и логических схем

Синтез булевой формулы, реализующей заданную функцию, получаем на основе методов последовательной или параллельной декомпозиции [7]. Суть их заключается в том, чтобы на основе конструктивных (выравнивающих) операций получать на каждом шаге подформулу одного строения с некоторой базисной формулой.

Синтез схемы из функциональных элементов состоит в дальнейшей замене подформул, полученных в результате декомпозиции, соответствующими базисными элементами, сохраняя связи между подформулами и с основной суперпозиционной формулой. При этом, соединяя функциональные элементы, с целью минимизации сложности схемы можно применять ветвление, т. е. выход одного функционального элемента подсоединять к нескольким входам других элементов схемы. Ветвление иногда приводит к уменьшению или увеличению глубины схемы, поэтому необходимо устанавливать приоритетность оптимизации критериев качества схемы.

Знания проблемной области. Функционалы качества декомпозиции

Для классов функций &, $\vee$, $\oplus$ и ~ представление любой из них n-местной функции $f^{(n)}$ через n'-местную базисную функцию $g^{(n')}$ того же класса характеризуется следующими показателями качества (сложности):

$$L_Б(f^{(n)}, G) = n; \quad (5)$$

$$L_F(f, g, w)^{\text{парал}}_{\min} = L_S(f, g, w)^{\text{парал}}_{\min} = \left\lceil \frac{n-1}{n'-1} \right\rceil; \quad (6)$$

$$Dep_F(f, g, w)^{\text{парал}}_{\min} = Dep_S(f, g, w)^{\text{парал}}_{\min} = \lceil \log_{n'} n \rceil. \quad (7)$$

Пусть функции f и g задаются формулами одного типа (из классов дизъюнктивной (ДНФ) и конъюнктивной (КНФ) нормальных форм и полиномов Жегалкина) и имеют соответственно строение $r = (r_1, \ldots, r_m)$ и $q = (q_1, \ldots, q_{m'})$, причем $q_1 \geqslant q_2 \geqslant \ldots \geqslant q_{m'}$. Тогда на основе параллельной декомпозиции функции f в базисе $G = \{g\}$, где g — бесповторная (для простоты изложения) формула, получены выражения для следующих двух случаев [9].

Если $1 < m \leqslant m'$, то функционалы качества имеют вид

$$L_F(f, g, w) = 1 + \sum_{i=1}^{m} \left\lceil \frac{R_i - 1}{q_1 - 1} \right\rceil; \quad (8)$$

$$Dep_F(f, g, w) = 1 + \max\{|\log_{q_1} R_i|\} \text{ при } 1 \leqslant i \leqslant m,$$

где $R_i = \begin{cases} r_i - q_i + 1, & \text{если } r_i > q_i; \\ 1, & \text{если } r_i \leqslant q_i. \end{cases}$

Если $m > m'$ (для случая, когда базовым является предыдущий), то получим следующие выражения для функционалов качества:

$$L_F(f, g, w) = \left\lceil \frac{m-1}{m'-1} \right\rceil + \sum_{i=1}^{s_0} \sum_{j=1}^{m'} \left\lceil \frac{R_{ij} - 1}{q_1 - 1} \right\rceil; \quad (9)$$

$$Dep_F(f, g, w) = \lceil \log_{m'} m \rceil + \max\{\lceil \log_{q_1} R_{ij} \rceil\}$$
$$\text{при } 1 \leqslant i \leqslant s_0, \ 1 \leqslant j \leqslant m', \quad (10)$$

где

$$R_{ij} = \begin{cases} r(i-1)m' + j^{-q_j+1}, & \text{если } r(i-1)m' + j > q_j; \\ 1, & \text{если } r(i-1)m' + j \leqslant q_j. \end{cases}$$

Эти функционалы есть арифметические (причем изоморфные) аналоги шагов структурно-функциональной декомпозиции.

Алгоритм синтеза формул на основе базы знаний

Рассмотрим общий алгоритм оптимального или близкого к нему синтеза формулы (или комбинационного автомата) для исходной функции $f^{(n)}$ и базиса G, т. е. для заданной пары $(f^{(n)}, G)$. При этом согласно работе [9], используется математико-информационное описание булевых формул, их строение и методы и алгоритмы параллельной декомпозиции на основе конструктивных операций приведения исходной формулы в суперпозицию функций одного строения с соответствующими базисными.

Алгоритм 1

Шаг 1. Выполнить анализ заданных функций $f^{(n)}$ и базиса G на основе базы знаний с целью выбора способа w.

Шаг 2. Представить (виртуально) функцию $f^{(n)}$ в базисе G, т. е. подобрать все необходимые операции. Работа с базой знаний.

Шаг 3. Для тройки $(f^{(n)}, G, w)$ вычислить значений показателей качества $L_Б(f^{(n)}, G)$, $L_F(f, G, w)$, $Dep_F(f, G, w)$ будущей реализации. Работа с базой знаний.

Шаг 4. Проанализировать вычисленные значения, сравнить со значениями на предыдущем шаге. Работа с базой знаний. Если текущие значения $L_Б(f^{(n)}, G)$, $L_F(f, G, w)$, $Dep_F(f, G, w)$ больше предыдущих, то сформировать новый способ w и перейти к шагу 2.

Шаг 5. Для выбранного способа w и вычисленных $L_Б(f^{(n)}, G)$, $L_F(f, G, w)$, $Dep_F(f, G, w)$ осуществить построение формулы F (или цифровой интегральной схемы S) с принятыми значениями показателей качества (сложности). Работа с базой знаний.

Шаг 6. Конец алгоритма. Получена формула F (или цифровая интегральная схема S) с тройкой $(L_Б(f^{(n)}, G), L_F(f, G, w), Dep_F(f, G, w))$.

Используя неявно упорядоченные наборы, записи, можно дополнительно существенно уменьшать трудоемкость и вычислительную сложность алгоритма 1 (решения задачи).

Примеры пополнения базы знаний

Пример 2. Используя свойства функций класса ~, их представление может быть сведено к представлению в классе $\oplus$ (возможно и обратное преобразование). При $n = 2$ получаем $x_1 \sim x_2 = \overline{x_1 \oplus x_2} = x_1 \oplus x_2 \oplus 1$, при $n = 3$ получаем $x_1 \sim x_2 \sim x_3 = \overline{\overline{x_1 \oplus x_2} \oplus x_3} = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$. Далее по индукции доказываем

$$x_1 \sim x_2 \sim \ldots \sim x_n = \begin{cases} x_1 \oplus x_2 \oplus \ldots \oplus x_n, & n \text{ — нечетное}, \\ x_1 \oplus x_2 \oplus \ldots \oplus x_n \oplus 1, & n \text{ — четное}. \end{cases} \quad (11)$$

Пример 3. Рассмотрим представление n-местной дизъюнкции $f^{(n)}$ — симметрической функции

(из базиса G_1) в базисе G_3 и получим точные оценки для их показателей качества (сложности) $L_Б$, L_K, L_F и Dep_F до и после преобразования. Итак, $f^{(n)} = x_1 \vee x_2 \vee ... \vee x_n$. Тогда

$$L_Б(f^{(n)}, G_1) = n;$$
$$L_K(f^{(n)}, G_1) = m = n;$$
$$L_F(f^{(n)}, G_1) = L_S(f^{(n)}, G_1) = n - 1;$$
$$Dep_F(f^{(n)}, G_1) = \mathrm{Dep}_S(f^{(n)}, G_1) = \lceil \log_2 n \rceil. \quad (12)$$

Используя известное преобразование $f^{(n)}$ в формулу над множеством {&, $^-$}, эквивалентность $\bar{x} = x \oplus 1$ и свойство дистрибутивности конъюнкции относительно сложения по mod2 (свойства булевых функций), получаем для $f^{(2)} = x_1 \vee x_2 = x_1x_2 \oplus x_1 \oplus x_2$ [2, 3]. Далее доказываем по индукции

$$f^{(n)} = x_1 \vee x_2 \vee ... \vee x_n = (x_1x_2 ... x_n) \oplus$$
$$\oplus (x_1x_2 ... x_{n-1} \oplus ... \oplus x_2x_3 ... x_n) \oplus ... \oplus$$
$$\oplus (x_1 \oplus x_2 \oplus ... \oplus x_n), \quad (13)$$

получая при этом следующее строение

$$r = (n, n - 1, ..., n - 1, n - 2, ..., n - 2, ..., 1, ..., 1) \quad (14)$$

полинома Жегалкина в уравнение (13).

Таким образом, для функции $f^{(n)} = x_1 \vee x_2 \vee ... \vee x_n$ в базисе G_3 получаем следующие значения показателей качества (сложности) формулы F:

$$L_Б(f^{(n)}, G_3) = n2^{n-1}; \quad (15)$$

$$L_K(f^{(n)}, G_3) = 2^n - 1; \quad (16)$$

$$L_F(f^{(n)}, G_3) = n2^{n-1} - 1; \quad (17)$$

для глубины $Dep_F(f^{(n)}, G_3)$ и $-Dep_S(f^{(n)}, G_3)$ имеется достижимая верхняя оценка [7] для схемы без ветвления

$$\lceil \log_2 L_Б(f^{(n)}, G_3) \rceil + 1 = n + \lceil \log_2 n \rceil \quad (18)$$

и ее (верхнюю оценку) можно также подсчитать по алгоритму 1 (моделирование это подтверждает).

Итак, получены группа оценок (12) до преобразования и соответствующие оценки (15)—(18) после преобразования. Последние характеризуются значительной сложностью (таков класс формул). Естественно, ставится задача их уменьшения, используя формулы другого типа или схемы с ветвлением.

Выбор базиса

Выше определены порождающие базисы, причем второй предшествует первому, а первый — третий и второй — третий базисы не сравнимы. Если для некоторого базиса взять конечную последовательность базисов ($G_0 \leqslant G_1 \leqslant ... \leqslant G_k$), находящихся в отношении предшествования (по определению 3), завершающуюся таким базисом, что в нем имеется, по крайней мере, одна функция сложнее реализуемой, то для членов этой последовательности значения показателя качества монотонно уменьшаются и в конечном итоге станут равными единице. Поэтому для последнего базиса последовательности выбираем максимальные значения параметров, которые больше значений соответствующих параметров функции $f^{(n)}$.

Для конкретной булевой функции $f^{(n)}$ можно подобрать "хороший" последний базис G_k, но в практике синтеза ИС базис задается для системы произвольных булевых функций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа содержит подходы к получению оценок для различных показателей сложности ИС. К рассмотренным классам функций можно отнести последовательности функций $\overline{x_1 \vee x_2} = x_1x_2 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus 1$, ..., $\overline{x_1 \vee ... \vee x_n}$ и $\overline{x_1x_2} = x_1x_2 \oplus 1$, ..., $\overline{x_1...x_n} = x_1 ... x_n \oplus 1$, применяя полученные результаты.

Все рассматриваемые модели и полученные результаты допускают структуризацию представления знаний в ЭВМ о рассматриваемой предметной области, более того, именно подход на основе понятия строение—структура и позволил получить новые результаты.

Полученные знания о предметной области можно записывать и хранить в ЭВМ при помощи специально организованной таблицы или системы таблиц, а также использовать в интеллектуальных системах синтеза интегральных схем. Заметим, что полученные представления могут иметь место и для других базисов (важно только, чтобы исходная формула имела строение).

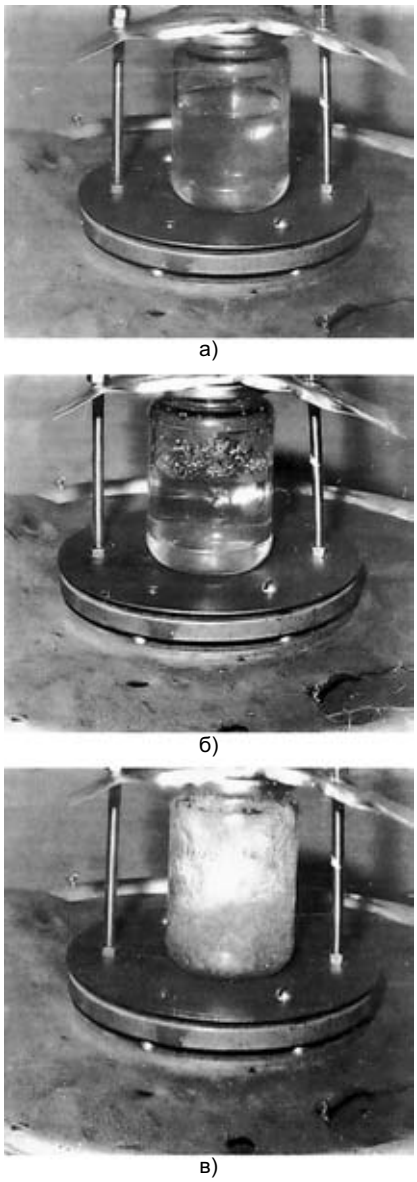
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яблонский С. В.* Введение в дискретную математику. М.: Наука, 1986.
2. *Черухин Д. Ю.* Проблема сравнения булевых базисов. http://mech.math.msu.su/department/dm/dmmc/Science/boolb.htm.2005.
3. *Лупанов О. Б.* О сложности реализации функций алгебры логики формулами // Проблемы кибернетики. М.: Физматгиз, 1960. Вып. 3.
4. *Субботовская Б. А.* О сравнении базисов при реализации функций алгебры логики // ДАН СССР. 1963. Т. 149. № 4.
5. *Мучник Б. А.* Оценка сложности реализации линейной функции формулами в некоторых базисах // Кибернетика. 1970. № 4.
6. *Черухин Д. Ю.* Алгоритмический критерий сравнения булевых базисов // Математические вопросы кибернетики. М.: Наука, 1999. Вып. 8.
7. *Чебурахин И. Ф.* Синтез дискретных управляющих систем и математическое моделирование: алгоритмы, программы. М.: Физматлит, 2004.
8. *Чебурахин И. Ф.* Методы декомпозиции булевых функций: алгоритмы, показатели качества, приложения // Изв. РАН. ТиСУ. 2003. № 5.
9. *Чебурахин И. Ф.* Показатели качества представления булевых функций для интеллектуальных систем синтеза БИС / Мат. Всерос. науч.-техн. конф. "Информационные технологии". Воронеж, май, 2005.

А. В. ИВАНАЙСКИЙ, канд. техн. наук, В. А ИВАНАЙСКИЙ, канд. техн. наук
Московский государственный открытый университет

Экспериментальное определение параметров возникновения низкочастотной вибрационной кавитации в воде

Существует ряд способов наблюдения и регистрации возникновения и протекания кавитационного процесса в воде: по изменению проводимости жидкости; воздействию кавитации на фольгу; искажению формы волны пульсациями давления (кавитационная вибрация), наблюдаемая на экране осциллографа) и др.



а)

б)

в)

Рис. 1. Характерная картина возникновения и протекания кавитационного процесса в воде: *а* — исходное состояние; *б* — переходное; *в* — процесс кавитации

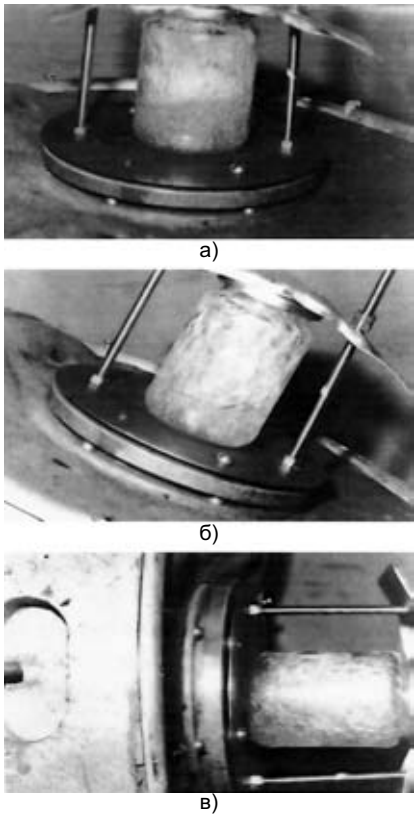
Проведенные исследования изменения проводимости электролита при электролизе меди показали, что при постоянном напряжении 3 В увеличение скорости вибрационного воздействия до 0,25 м/с на всех заданных частотах (16—120 Гц) увеличивает ток до 3 раз по отношению к установившемуся, т. е. если установившийся ток был равен 4 А, то при вибрационном воздействии со скоростью более 0,25 м/с он увеличивается до 12 А. Дальнейшее увеличение виброскорости волновода существенно не влияет на изменение тока. Характерная картина возникновения и протекания кавитационного процесса в воде при частоте 50 Гц приведена на рис. 1.

В производственных условиях удобно оценивать наличие кавитационного процесса и его интенсивность в объеме жидкости по разрушению тонкой алюминиевой фольги. На сосуд с водой, в который вмонтирована рама с тонкой (0,02 мм) алюминиевой фольгой, воздействовали вибрациями различной интенсивности. Рамку с фольгой устанавливали перпендикулярно излучателю и обрабатывали низкочастотными колебаниями в течение 10—15 с.

В зонах интенсивной кавитации фольга разрушается с образованием сквозных точечных отверстий. По расположению этих отверстий судили о форме кавитационного поля и распределении области кавитации в любой точке объема жидкости.

Такая же картина была обнаружена и при углах наклона бочки стенда 5°, 45° и 90° относительно вертикальной оси (рис. 2).

Одновременная подача газа (воздуха) приводит к быстрому смешиванию, что обусловливает возможность развития интенсивных макродвижений вихревого характера при воздействии на смешиваемые компоненты колебаниями со скоростью, выше "по-



а)

б)

в)

Рис. 2. Протекание кавитационного процесса в воде при наклоне бочки стенда 5° (*а*), 45° (*б*) и 90° (*в*)

роговой" (0,25 м/с). При отсутствии подачи газа процесс перемешивания затрудняется, вихревые макротечения в жидкости не развиваются.

Минимальное количество газа, которое необходимо подать в емкость для того, чтобы начался интенсивный процесс смешивания, составляет 3 % общего объема компонентов. При увеличении объема подаваемого газа процесс перемешивания интенсифицируется. Наибольшее приемлемое количество газа составляет 10—20 %. В этом случае смешивание идет быстро, отличаясь тонкостью и равномерностью. Подача в емкость более 20 % газа отрицательно сказывается на производительности, поэтому из практических соображений желательно ограничить количество подаваемого газа этой величиной.

Влияние газа на возникновение и протекание кавитационного процесса жидкости можно объяснить следующим образом. Известны несколько видов кавитации, в частности, паровая и газовая, возникающие под действием колебаний. При этом под кавитацией понимают возникновение в жидкости разрывов (каверн), которые при схлопывании порождают различные физические эффекты (повышение температуры в зоне схлопывания, гидравлический удар, электрические явления). Каверны обычно заполнены паром той жидкости, в которой возникает явление кавитации.

Для возникновения вибрационной кавитации требуется значительная энергия, достаточная для возникновения разрыва жидкости (нарушение ее сплошности).

Если же жидкость насытить газом либо другими добавками, которые уменьшают сцепление молекул жидкости друг с другом, то получить кавитацию (т. е. разрывы-каверны в жидкости) можно на более низком энергетическом уровне. Зародышем каверн становятся пузырьки воздуха, насыщающего жидкость — чем больше воздуха содержится в жидкости, тем легче (т. е. на все более низком энергетическом уровне) получить в ней режим вибрационной кавитации. Каверны в этом случае заполнены воздухом и паром, а кавитация паровая переходит в газовую.

Для подтверждения наличия кавитационного эффекта в жидкости определили момент его возникновения и протекания с помощью специального датчика измерения давления кавитационных микроударных волн. Кавитационная вибрация возникает при образовании кавитации в жидкости, так как кавитационный процесс является нестационарным и может сопровождаться сильными пульсациями. И если частота одной из пульсационных компонент совпадает с собственной частотой детали конструкции, возникает вибрация.

Датчик измерения давления кавитационных микроударных волн (рис. 3) состоит из двух стальных стержней *1* и *4*, между которыми установлена пьезокерамическая пластина *3* ЦТС-19, стержни соединены между собой с помощью текстолитовых пластин *7* и крепежа *2*. Стержень *4* вставлен в текстолитовую трубу *5* таким образом, чтобы его торец *6* соприкасался с жидкостью для восприятия ударных волн. С выводов *8* сигнал подается на светолучевой осциллограф СВ-13.

На вибростенде ВЭДС-100 устанавливали сосуд с водой, подвергали его вибрации, затем помещали в него датчик таким образом, чтобы он не касался стенок.

На рис. 4 приведены осциллограмы пульсаций давления в жидкости при частоте 120 и 50 Гц, полученные с помощью датчика.

Распространение высокоэнергетических колебаний в жидких средах независимо от частоты приводит к возникновению кави-

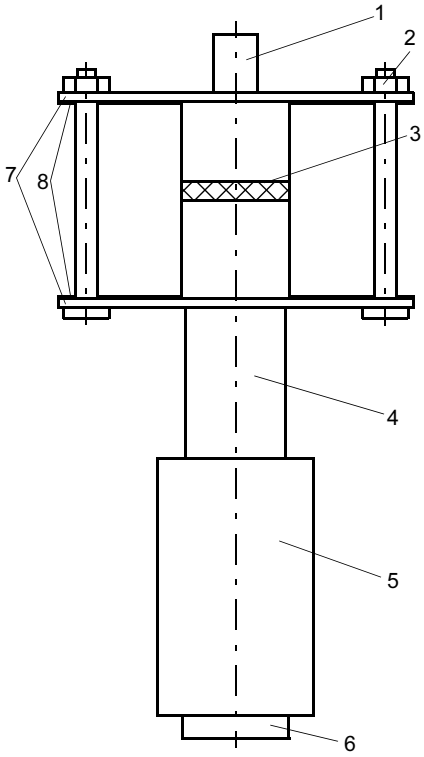
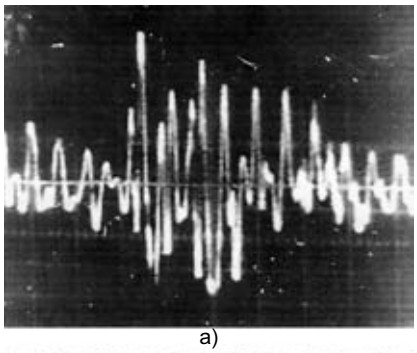
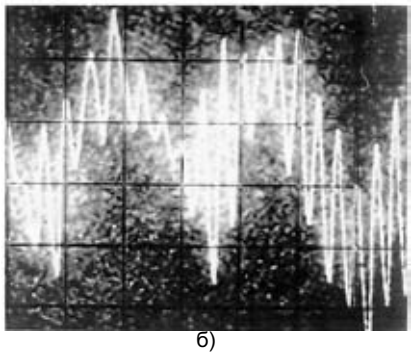


Рис. 3. Датчик измерения давления кавитационных микроударных волн



а)



б)

Рис. 4. Характер изменения давления (пульсации) в жидкости при вибрации с частотой 120 (*а*) и 50 (*б*) Гц

тации, т. е. образованию большого количества разрывов и полостей в жидкости под воздействием растягивающих усилий, создаваемых волной в фазе разрежений и с последующим их захлопыванием в фазе сжатия. Скорость сжатия, вызываемая силами поверхностного натяжения и звуковым давлением, может достигать значительных величин, вызывая гидравлическую ударную волну. Поэтому вызывает интерес и имеет практическое значение выбор оптимальных параметров вибрации и соответственно вибраторов, обеспечивающих возникновение виброперемешивания и, как следствие, кавитацию во всем объеме жидкости [1].

Для решения поставленной задачи экспериментально определили пороговые значения виброскорости волновода, т. е. значения, при которых возникает кавитационный процесс во всем объеме жидкости, а затем на основе полученных данных рассчитали высоту столба кавитирующей жидкости.

Практическое определение параметров низкочастотной вибрационной кавитации производили на установке, в которой излучателями колебаний являются подвижные столы электродинамических стендов ВЭДС-10 и ВЭДС-100. В процессе экспериментов фиксировали значения амплитудного ускорения, выраженного в ускорении свободного падения, при котором возникает кавитация в жидкости при заданной частоте (16—120 Гц). Полное развитие кавитационного процесса в жидкости оценивали по увеличению ее объема на 1/3 часть сосуда и развитию турбулизации.

Скорость сжатия, вызываемая силами поверхностного натяжения и звуковым давлением, может достигать значительных величин, вызывая гидравлическую ударную волну, поэтому выбор оптимальных параметров вибрации и соответственно вибраторов, обеспечивающих возникновение виброперемешивания и, как следствие, кавитацию во всем объеме жидкости, имеет практическое значение.

Для решения поставленной задачи экспериментально определили пороговое значение виброскорости волновода, при котором возникает кавитационный процесс во всем объеме жидкости, а затем на основе полученных данных рассчитали высоту столба кавитирующей жидкости.

При расчете высоты столба кавитирующей жидкости приняли, что поглощение энергии в слое пропорционально количеству энергии, подводимой к этому слою, и его толщине:

$$dJ = -\alpha J dx, \qquad (1)$$

отсюда

$$J = C l^{-\alpha x}, \qquad (2)$$

где α — коэффициент поглощения звука в вязкой среде, равный

$$\frac{\omega^2}{2\rho c^3}\left(\frac{4}{3}\eta + \xi\right) \qquad (3)$$

(ρ — плотность жидкости, кг/м^3; c — скорость звука в среде, м/с; ω — круговая частота, с$^{-1}$; η — кинематическая вязкость, м^2/с; ξ — объемная вязкость, м$^{-1}$).

Выделим на линии распределения волн два произвольных сечения на расстоянии x_1 и x_2 от источника колебаний.

Для этих сечений

$$J_1 = C l^{-\alpha x_1}; \qquad (4)$$

$$\frac{J_2}{J_1} = l^{-\alpha(x_2 - x_1)}. \qquad (5)$$

Известно, что энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды, следовательно

$$\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 = l^{-\alpha(x_2 - x_1)}, \qquad (6)$$

где z_1, z_2 — амплитуда колебаний в жидкости на расстоянии соответственно x_1 и x_2 от дна емкости или

$$\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 = l^{-\frac{\alpha}{2}(x_2 - x_1)}. \qquad (7)$$

Подставив выражение (3) в выражение (7), получим

$$\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 = l^{-\frac{\omega^2}{2\rho c^3}\left(\frac{4}{3}\eta + \xi\right)(x_2 - x_1)}. \qquad (8)$$

По формуле (8) можно определять амплитуду колебаний на любом расстоянии от волновода.

В случае, когда амплитуда колебаний скорости волновода меньше ее порогового значения v, произведение $\omega z < 0{,}25$ м/с — на этой высоте от дна емкости кавитация не возникает. В этом случае необходимо увеличить амплитуду колебаний до значения, обеспечивающего ее возникновение.

Таким образом, определение высоты столба кавитирующей жидкости позволит расчетным путем определять режимы вибраций, обеспечивающих вибрационное перемешивание во всем обрабатываемом объеме, что упростит подбор требуемого оборудования и сократит объем экспериментальных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванайский А. В.* Исследование свойств литых антифрикционных алюминий—свинец—графитовых сплавов, разработка и внедрение технологии получения из них отливок. Дисс. ... канд. техн. наук. М., 1988. 140 с.
2. *Уразбаев Б. К., Иванайский А. В., Колочков Б. И.* Расчет, исследование и проектирование транспортирующих и грузоподъемных машин. Алма-Ата: КазПТИ, 1986. С. 116—112.

Ю. В. ШЕВЕЛЕВ, инж.
ОАО "НПП "Эталон"

Перспективы обеспечения испытательных лабораторий метрологическим оборудованием

Как известно, в 1993 г. под эгидой Международного комитета мер и весов (МКМВ) и других международных метрологических организаций было разработано "Руководство по выражению неопределенности измерений", переведенное и опубликованное ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в 1999 г. Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации в 2001 г. выпущены рекомендации по применению данного руководства РМГ 43—2001. Из этого следует, что нужно готовиться к выражению метрологических характеристик поверочных лабораторий и отдельного оборудования не в виде погрешности, а в виде неопределенности измерений.

Приведем определения этих понятий, взятые из Международного словаря основных и общих терминов в метрологии:

— "погрешность измерения (error of a measurement)" — отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины;

— "неопределенность измерения (uncertainty of a measurement)" — параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые могли быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Из этих определений следует, что возможен случай, когда результат измерения имеет, например, пренебрежимо малую погрешность при большой неопределенности.

На основе рекомендаций РМГ 43—2001 предлагаем следующий алгоритм расчета неопределенности поверки термопреобразователя сопротивления (ТС) в термостате или калибраторе.

(Примечание. При разработке данного алгоритма использовали материалы из проекта новой редакции ГОСТ Р 8.461).

1. Суммарную стандартную и расширенную неопределенность поверки ТС необходимо рассчитывать для каждой температуры поверки. При расчете суммарной неопределенности поверки учитывается неопределенность измерений температуры эталонным (образцовым) термометром и неопределенность измеренного значения сопротивления градуируемого термометра. Для расчета используют данные, полученные при проведении измерений и предварительной экспериментальной оценке неопределенности, связанной со случайными эффектами при измерении в конкретной поверочной лаборатории, а также приведенные в свидетельствах о поверке средств измерений: термостата или калибратора, эталонного термометра и измерительной установки.

2. В случае применения сухоблочных калибраторов необходимо учитывать неопределенность, вызванную теплоотводом по арматуре ТС. В данном примере эта составляющая опущена.

3. Значение температуры, определенное по показаниям эталонного термометра сопротивления,

$$t_x = t_s(R_s), \qquad (1)$$

где $t_s(R_s)$ — среднее арифметическое из результатов измерения температуры, определяемое по формуле

$$t_s(R_s) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} t(R_{si}), \qquad (2)$$

где N — количество измерений сопротивления эталонного термометра, выполненных при поверке; R_{si} — сопротивление эталонного термометра сопротивления при i-м измерении; $t(R_{si})$ — температура, соответствующая i-му измерению, рассчитанная по интерполяционной зависимости сопротивление—температура, приведенной в свидетельстве о поверке эталонного термометра.

4. Бюджет неопределенности для температуры, измеренной эталонным термометром, включает следующие составляющие:

4.1. Стандартная неопределенность, обусловленная случайными эффектами при измерениях, выполненных в одном измерительном цикле эталонным термометром, рассчитывается по формуле

$$u(r_{lab1-j}) = \frac{u(r_{lab1})}{\sqrt{N_j}}, \qquad (3)$$

где $u(r_{lab1})$ — СКО единичного измерения сопротивления эталонного термометра; N_j — количество измерений в одном измерительном цикле.

4.2. Стандартная неопределенность, обусловленная нестабильностью температуры в термостате за время всех циклов измерений, рассчитывается по типу В:

$$u(t_s) = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2\sqrt{3}}, \qquad (4)$$

где $t_{\max}$, $t_{\min}$ — соответственно максимальная и минимальная температура, измеренная эталонным термометром за время проведения всех измерительных циклов.

4.3. Стандартная неопределенность поверки эталонного термометра

$$u(\delta t_c) = U_э/2, \quad (5)$$

где $U_э$ — расширенная неопределенность поверки эталонного термометра при $k = 2$, приведенная в свидетельстве о его поверке (или доверительная погрешность при доверительной вероятности 95 %).

4.4. Стандартная неопределенность, обусловленная неточностью электроизмерительной установки,

$$u(\delta r_s) = U_s/2, \quad (6)$$

где U_s — расширенная неопределенность измерения при $k = 2$, приведенная в свидетельстве о поверке установок для измерения сопротивления.

Примечание. Если в свидетельстве о поверке установки указан предел допускаемой погрешности $\pm\Delta_{пр}$, то стандартная неопределенность рассчитывается по типу В (нормальное распределение): $u(\delta r_s) = \Delta_{пр}/\sqrt{3}$.

4.5. Стандартная неопределенность, вызванная ограниченной разрешающей способностью отсчетных устройств электроизмерительной установки δ_{rs}, оценивается по типу В

$$u(\delta_{rs}) = \frac{a_{rs}}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

где $\pm a_{rs}$ — разрешающая способность установки для измерения сопротивления эталонного термометра.

4.6. Стандартная неопределенность из-за нестабильности эталонного термометра за межповерочный интервал оценивается по типу В:

$$u(\delta t_T) = \frac{a_T}{\sqrt{3}}, \quad (8)$$

где $\pm a_T$ — интервал возможного изменения сопротивления эталонного термометра в тройной точке воды в температурном эквиваленте, определенный экспериментально при периодической поверке эталонного термометра и приведенный в свидетельстве о его поверке.

5. Составляется бюджет неопределенности измерения температуры в термостате эталонным термометром (табл. 1).

6. Суммарная стандартная неопределенность результата измерения температуры эталонным термометром рассчитывается по формуле

$$u_c(t_x) = \sqrt{\frac{1}{C_1^2}u^2(\delta r_{lab1-j}) + u^2(t_s) + u^2(\delta t_c) + \frac{1}{C_1^2}u^2(\delta r_s) + \frac{1}{C_1^2}u^2(\delta r_{rs}) + u^2(\delta t_T)}. \quad (9)$$

7. Значение сопротивления градуируемого ТС при температуре t_x

$$R_k(t_x) = R_{ks}(t_x) + C_2\delta t_{F_1} + C_2\delta t_{F_2}, \quad (10)$$

Таблица 1

Источник неопределенности	Оценка стандартной неопределенности, тип, распределение, метод расчета	Коэффициент влияния	Вклад в суммарную стандартную неопределенность
Случайные эффекты при измерении	Тип А, нормальное распределение $u(\delta r_{lab1-j})$ 4.1	$\frac{1}{C_1}$	$u(\delta r_{lab1-j})/C_1$
Нестабильность температуры в термостате	Тип В, равномерное распределение $u(t_s)$ 4.2	1	$u(t_s)$
Поверка эталонного термометра	Тип В, нормальное распределение $u(\delta t_c)$ 4.3	1	$u(\delta t_c)$
Неточность измерительной установки	Тип В, нормальное распределение $u(\delta r_s)$ 4.4	$\frac{1}{C_1}$	$\frac{1}{C_1}u(\delta r_s)$
Разрешающая способность измерительной установки	Тип В, равномерное распределение $u(\delta r_{rs})$ 4.5	$\frac{1}{C_1}$	$\frac{1}{C_1}u(\delta r_{rs})$
Нестабильность эталонного термометра за межповерочный интервал	Тип В, равномерное распределение $u(\delta t_T)$ 4.6	1	$u(\delta t_T)$

Обозначение. C_1 — коэффициент чувствительности эталонного термометра dR/dt, Ом/°С, определяемый при температуре t_S по уравнению, приведенному в свидетельстве о поверке термометра.

где C_2 — коэффициент чувствительности ТС, определяемый по уравнению НСХ ТС при температуре t_x; δt_{F1} — поправка, равная изменению температуры по вертикальной оси рабочего объема термостата или калибратора между средней точкой ЧЭ поверяемого ТС и эталонного термометра; δt_{F2} — поправка, равная изменению температуры по горизонтальной оси между ЧЭ поверяемого ТС и эталонного термометра (или между каналами блока сухоблочного калибратора); $R_{ks}(t_x)$ рассчитывается как среднее арифметическое значение результатов измерения сопротивления ТС при поверке:

$$R_{ks}(t_x) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} R_{ki}, \quad (11)$$

где N — количество измерений сопротивления ТС; R_{ki} — результат i-го измерения сопротивления ТС.

Примечание. Поправки на вертикальный и горизонтальный градиенты температуры вводятся по результатам исследований термостата в поверочной лаборатории. Если при поверке термостата или калибратора градиент температуры определяли только в виде пределов отклонения температуры от среднего значения $\pm aF1$, $\pm aF2$, либо если не известна длина ЧЭ поверяемых термометров, то поправки принимают равными нулю. Градиент учитывают только введением неопределенности по п. 8.4.

8. Бюджет неопределенности измерений сопротивления ТС включает следующие составляющие:

8.1. Стандартная неопределенность, обусловленная случайными эффектами при измерениях, выполненных в одном измерительном цикле пове-

ряемым ТС:

$$u(r_{lab2-j}) = \frac{u(r_{lab2})}{\sqrt{N_j}}, \qquad (12)$$

где $u(r_{lab2})$ — СКО единичного измерения сопротивления ТС; N_j — количество измерений сопротивления ТС в каждом цикле.

8.2. Стандартная неопределенность, обусловленная неточностью электроизмерительной установки,

$$u(\delta r_k) = U_k/2, \qquad (13)$$

где U_k — расширенная неопределенность измерения при $k = 2$, приведенная в свидетельстве о поверке установок для измерения сопротивления ТС.

Примечание. Если в свидетельстве о поверке установки указан предел допускаемой погрешности $\pm\Delta_{пр}$, то стандартная неопределенность рассчитывается по типу В по формуле $u(\delta r_k) = \Delta_{пр}/\sqrt{3}$.

8.3. Стандартная неопределенность, обусловленная ограниченной разрешающей способностью отсчетных устройств электроизмерительной установки δ_{rk},

$$u(\delta_{rk}) = \frac{a_{rk}}{\sqrt{3}}, \qquad (14)$$

где $\pm a_{rk}$ — разрешающая способность установки для измерения сопротивления ТС.

8.4. Стандартные неопределенности, обусловленные вертикальным и горизонтальным градиентами температур в термостате или калибраторе

$$u(\delta t_{F1}) = \frac{a_{F1}}{\sqrt{3}}; \quad u(\delta t_{F2}) = \frac{a_{F2}}{\sqrt{3}}, \qquad (15)$$

где $\pm a_{F1}$, $\pm a_{F2}$ — диапазон изменения поправок к температуре, оцениваемый экспериментально при поверке термостата или калибратора.

9. Бюджет неопределенности измерения сопротивления ТС представлен в табл. 2.

10. Суммарная стандартная неопределенность измерения сопротивления ТС

$$u_c(R_k) = \sqrt{u^2(r_{lab2-j}) + u^2(\delta r_k) + u^2(\delta r_{rk}) + C_2^2 u^2(\delta t_{F1}) + C_2^2 u^2(\delta t_{F2})}. \qquad (16)$$

11. Суммарная стандартная неопределенность $u_c(R)$ и расширенная неопределенность U поверки термометра в каждой температурной точке рассчитываются по формулам:

$$u_c(R) = \sqrt{C_2^2 u_c^2(t_x) + u_c^2(R_k)}; \qquad (17)$$

$$U = k u_c(R), \qquad (18)$$

где k — коэффициент охвата.

12. Таким образом получаем оценку неопределенности поверки ТС на данном оборудовании: при $k = 2$ сопротивление градуируемого термометра при температуре t_x находится в интервале $R_k(t_x) \pm U$ с вероятностью 95 % в предположении нормального закона распределения; неопределенность поверки ТС в единицах температуры рассчитывается делением U на коэффициент чувствительности C_2.

Таблица 2

Источник неопределенности	Оценка стандартной неопределенности, тип, распределение, методика расчета	Коэффициент влияния	Вклад в суммарную стандартную неопределенность
Случайные эффекты при измерении	Тип А, нормальное распределение $u(r_{lab2-j})$ п. 8.1	1	$u(r_{lab2-j})$
Неточность измерительной установки	Тип В, нормальное распределение $u(\delta r_k)$ п. 8.2	1	$u(\delta r_k)$
Разрешающая способность измерительной установки	Тип В, равномерное распределение $u(\delta r_{rk})$ п. 8.3	1	$u(\delta r_{rk})$
Перепад температур по вертикальной оси рабочего объема	Тип В, равномерное распределение $u(\delta t_{F1})$ п. 8.4	C_2	$C_2 u(\delta t_{F1})$
Перепад температур по горизонтальной оси рабочего объема (либо между каналами в блоке)	Тип В, равномерное распределение $u(\delta t_{F2})$ п. 8.4	C_2	$C_2 u(\delta t_{F2})$

13. Заключение о годности ТС необходимо выдавать при условии выполнения соотношения

$$(R_k(t_x) - R_{HCX}(t_x) \pm U)/\frac{\partial R}{\partial t} \leqslant \Delta t_x, \qquad (19)$$

где $R_k(t_x)$ — среднее значение сопротивления поверяемого ТС, Ом; t_x — средняя температура, измеренная эталонным термометром, °С; $R_{HCX}(t_x)$ — сопротивление ТС по НСХ при температуре t_x, Ом; U — расширенная неопределенность результата измерения сопротивления ТС; Δt_x — допуск ТС (ГОСТ Р 6651) при температуре t_x, °С.

По сложившейся практике перед использованием средств поверки ТС необходимо рассчитать предполагаемую расширенную неопределенность поверки ТС с помощью используемой аппаратуры с целью определения степени пригодности данной аппаратуры для поверки конкретного типа ТС.

Критерием пригодности применяемой аппаратуры для поверки данного ТС будет служить, например, рассчитанная расширенная неопределенность поверки ТС, которая должна быть в два раза меньше требуемого допуска ТС по ГОСТ 6651—94.

Рассмотрим предлагаемый алгоритм расчета неопределенности поверки на примере оценки неопределенности поверки ТС класса А при 100 °С с применением жидкостного термостата ТР-1М-300. Информация о поверяемом термометре: термометр сопротивления типа ТСП; класс А (ГОСТ Р 6651); допуск при 100 °С ± 0,35 °С.

Средства измерений, применяемые при поверке:

Таблица 3

Источник неопределенности и метод расчета	Оценка стандартной неопределенности	Коэффициент влияния	Вклад в суммарную стандартную неопределенность
Случайные эффекты при измерении (по пяти измерениям), $u(\delta r_{lab-5}) = u(\delta r_{lab})/\sqrt{5}$	0,0022	1/0,385	0,0058
Нестабильность температуры в термостате, $u(t_S) = (t_{max} - t_{min})/2\sqrt{3}$	0,0289	1	0,0289
Градуировка эталонного термометра, $u(\delta t_c) = U_э/2$	0,0150	1	0,0150
Электроизмерительная установка, $u(\delta r_s) = U_s/\sqrt{3}$	0,0081	1/0,385	0,0210
Разрешающая способность электроизмерительной установки, $u(\delta_{rk}) = a_{rk}/\sqrt{3}$	0	1/0,385	0
Нестабильность эталонного термометра за межповерочный интервал, $u(\delta t_T) = a_э/\sqrt{3}$	0,0058	1	0,0058
Суммарная стандартная неопределенность температуры, $u_c(t_x)$, °С			0,0396

Таблица 4

Источник неопределенности	Оценка стандартной неопределенности	Коэффициент влияния	Вклад в суммарную стандартную неопределенность
Случайные эффекты при измерении, $u(\delta r_{lab-5}) = u(\delta r_{lab})/\sqrt{5}$	0,0022	1	0,0022
Электроизмерительная установка, $u(\delta r_k) = U_s/3$	0,0081	1	0,0081
Разрешающая способность электроизмерительной установки, $u(\delta_{rk}) = a_{rk}/\sqrt{3}$	0	1	0
Перепад температуры по вертикальной оси рабочего объема, $u(\delta t_{F1}) = a_{F1}/\sqrt{3}$	0 (пренебрегли, так как эталонный и поверяемый датчики погрузили на одну глубину)	0,385	0
Перепад температуры по горизонтальной оси рабочего объема, $u(\delta t_{F2}) = a_{F2}/\sqrt{3}$	0,0115	0,385	0,0045
Суммарная стандартная неопределенность сопротивления, $u_c(R_k)$, Ом	—	—	0,0095

Таблица 5

Температура, °С	Допуск ТСП (ГОСТ 6651), °С			Расширенная неопределенность поверки с помощью термостата (пригодность для поверки ТСП класса, указывается самый точный класс)					
	А	В	С	ТН-2М	ТП-2	КР-40-2	КР-190	ТР-1М-300	ТР-1М-В
–190	0,53	1,25	2,12	—	—	—	0,140 (А)	—	—
–60	0,27	0,60	1,08	—	—	—	0,135 (А)	—	—
–40	0,23	0,50	0,92	—	—	0,065 (А)	—	—	—
0	0,15	0,30	0,60	0,066 (А)	—	0,066 (А)	—	—	—
40	0,23	0,50	0,92	—	—	0,074 (А)	—	0,087 (А)	—
100	0,35	0,80	1,40	—	0,104 (А)	—	—	0,093 (А)	0,093 (А)
200	0,55	1,30	2,20	—	—	—	—	0,104 (А)	0,104 (А)
300	0,75	1,80	3,00	—	—	—	—	—	0,122 (А)
600	1,35	3,30	5,40	—	—	—	—	—	—

- термостат регулируемый ТР-1М-300 (нестабильность температуры $\Delta_{ст} = \pm 0{,}05$ °С; неравномерность температуры в рабочем объеме $a_F = \pm 0{,}02$ °С);
- эталонный термометр (расширенная неопределенность или доверительная погрешность при доверительной вероятности 95 % при 100 °С $U_э = \pm$ 0,03 °С; нестабильность за межповерочный интервал $a_э = \pm$ 0,01 °С);
- АРМ ПТС (предел погрешности $U_s = \pm 0{,}014$ Ом);
- СКО результата измерения сопротивления 100-омного ТС в поверочной лаборатории при 95 °С $u(\delta r_{lab}) = 0{,}005$ Ом (значение получено заранее экспериментальным методом).

Бюджет неопределенности измерения температуры в термостате эталонным термометром приведен в табл. 3. Бюджет неопределенности измерения сопротивления поверяемого ТС — в табл. 4.

Суммарную стандартную неопределенность поверки рассчитывали по формуле (17) при $C_2 = 0{,}385$ Ом/°С: $u_c(R) = 0{,}0182$ Ом.

При $k = 2$ расширенная неопределенность поверки по формуле (18) $U = 0{,}0363$ Ом. В температурном эквиваленте $U_t = 0{,}093$ °С: 0,093 °С < ± 0,35 °С/2.

Подобным образом была рассчитана неопределенность поверки ТС при разных температурах с применением метрологического оборудования ОАО НПП "Эталон" (табл. 5).

Из табл. 5 видно, что, несмотря на новый метод расчета требований к метрологическому оборудованию путем расчета расширенной неопределенности поверки ТС, все термостаты ОАО НПП "Эталон" пригодны для поверки ТС всех классов допуска, включая самый точный класс А.

Конечно, в настоящее время при поверке датчиков температуры метрологи нашей страны руководствуются ГОСТ 8.461—82 и 8.338—2002, в которых указаны требования к погрешностям средств изменения, применяемых при поверке. Однако надо быть готовыми к тому, что в новых редакциях этих ГОСТов будут указаны требования к неопределенности поверки.

А. А. ДУБОВ, д-р техн. наук, С. М. КОЛОКОЛЬНИКОВ, инж.
ООО "Энергодиагностика" (Москва)

Оценка качества сварных соединений методом магнитной памяти металла в сравнении с радиационным и ультразвуковым методами

Одной из важных и сложных проблем современного неразрушающего контроля (НК) качества сварных соединений разных типов является выявление в них зон с высокой неоднородностью напряженно-деформированного состояния (НДС) или зон концентрации напряжений. Это важно как для оптимизации технологического процесса сварки, так и при эксплуатации сварных соединений.

Традиционная дефектоскопия, ориентированная только на поиск несплошностей в сварных соединениях, не может обеспечить достоверную оценку их качества. Опираясь только на результаты дефектоскопии, технологу-сварщику трудно выявлять причины дефектности шва и совершенствовать технологию сварки.

В условиях, когда на надежность сварных соединений влияет множество факторов, необходим метод НК, интегрально оценивающий состояние металла сварного соединения.

В настоящее время в России разработан и успешно внедряется в различных отраслях промышленности принципиально новый метод диагностики металла изделий и сварных соединений, основанный на использовании эффекта магнитной памяти металла (МПМ)[1].

В соответствии с ГОСТ Р 52081—2003 МПМ — последействие, которое проявляется в виде остаточной намагниченности металла изделий и сварных соединений, сформировавшейся в процессе их изготовления и охлаждения в слабом магнитном поле или в виде необратимого изменения намагниченности изделий в зонах концентрации напряжений и повреждений от рабочих нагрузок.

Метод МПМ — метод неразрушающего контроля, основанный на анализе распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на поверхности изделий с целью определения зон концентрации напряжений, дефектов и неоднородности структуры металла и сварных соединений.

СМПР — магнитное поле рассеяния, возникающее на поверхности изделия в зонах скопления дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений и в зонах максимальной неоднородности структуры металла. Более подробно физические основы и практические возможности метода МПМ представлены в работах [1—3].

Путем считывания сигналов от остаточной намагниченности, сформировавшейся в процессе сварки, можно оценить фактическое состояние сварного шва с учетом структурной неоднородности, распределения остаточных напряжений и дефектов сварки.

Все дефекты (несплошности), заложенные в сварных соединениях на этапе изготовления, являются концентраторами напряжений. Однако плотности механической энергии в зоне концентрации напряжений может быть недостаточно для того, чтобы обеспечить развитие дефекта в процессе эксплуатации. Определение параметров дефектов при одновременной оценке их напряженного состояния является основной задачей метода МПМ.

В настоящее время накоплен значительный опыт контроля сварных соединений и имеется методология определения длины и глубины дефекта по амплитуде и ширине сигнала. Применение метода МПМ в области дефектоскопии активно развивается, при этом наиболее эффективным является сочетание метода МПМ с радиационным (РК) или ультразвуковым (УЗК) контролем.

Контроль качества сварных соединений методом МПМ осуществляется без зачистки металла и специального намагничивания, в ручном и автоматическом режиме, в массовом производстве на различных изделиях из углеродистых, аустенитных и феррито-аустенитных сталей.

Контроль выполняется с помощью специализированных малогабаритных приборов типа ИКН (измерители концентрации напряжений магнитометрические) с автономным питанием, укомплектованных сканирующими и регистрирующими устройствами. Серийное изготовление данных приборов организовано в России на предприятии "Энергодиагностика" (Москва). Приборы не имеют аналогов, аттестованы в Госстандарте РФ и включены в государственный реестр средств измерений.

На рис. 1 приведено многоканальное сканирующее устройство для проведения контроля методом МПМ стыковых сварных соединений трубы. Ферро-

[1] Патент 1769105 (РФ).

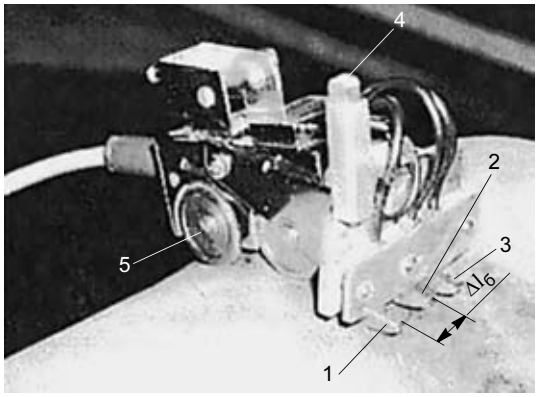


Рис. 1. Многоканальное сканирующее устройство для контроля методом МПМ стыковых сварных соединений труб ($\Delta l_б$ — базовое расстояние между феррозондовыми преобразователями): *5* — колеса привода измерителя длины

зондовые преобразователи *1* и *3* располагаются при контроле над ЗТВ с обеих сторон шва, преобразователь *2* расположен между ними посередине, а преобразователь *4*, развернутый в противоположную сторону, предназначен для отстройки от внешнего магнитного поля.

Результаты контроля участка сварного стыка паропровода из стали 12Х1МФ диаметром 273 мм с толщиной стенки 32 мм приведены на рис. 2.

Локальные изменения поля $H_р$ в данном случае соответствуют расположению дефектов в металле сварного шва, сформировавшихся при изготовлении (шлаковые включения, газовые поры).

На рис. 3 приведены результаты контроля сварного шва реактора полимеризации полихлорвинила R-701/2. Ширина сварного шва 15 мм. Стенки

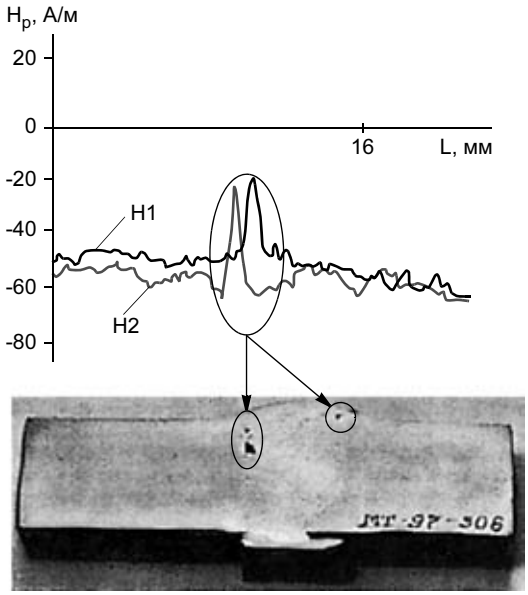


Рис. 2. Результаты обследования участка сварного стыка паропровода методом МПМ и путем анализа макроструктуры шлифа

корпуса реактора изготовлены из углеродистой стали толщиной 21 мм. Внутренняя поверхность реактора, со стороны которой проводился контроль, плакирована коррозионно-стойкой сталью 316L (стандарт AISI, США) толщиной 3 мм.

В зоне KH_{max}, характеризуемой скачкообразным изменением поля $H_р$, зафиксирован максимальный градиент поля dH/dx по третьему каналу $H3$. При контроле феррозондовый преобразователь располагался напротив ЗТВ сварного шва (см. схему контроля на рис. 1).

На рис. 3, *а* видно, что общая протяженность зоны KH_{max} составляет 40 мм. Однако протяженность участка, на котором градиент поля dH/dx имел максимальное значение и который соответствовал расположению локального дефекта, выявленного УЗК, составляла 10 мм. На рис. 3, *б* приведена диаграмма эхо-сигнала УЗК от дефекта на глубине шва 7,5 мм (поз. *2*) зафиксированного в зоне максимального градиента поля.

На рис. 4, *а* представлены результаты контроля методом МПМ участка радиального сварного шва днища химического реактора. При контроле в зоне KH_{max} *1* методом УЗК была выявлена трещина *4*. На рис. 4, *б* отмечено расположение выявленной трещины (длина трещины 15 мм).

Следует отметить, что вблизи трещины выявлена зона KH_{max}, характеризуемая разнополярным распределением поля $H_р$ по каналам Н1 *1* и Н2 *2* с максимальным градиентом поля по базе dH/dz *3*. Феррозондовые преобразователи каналов Н1 и Н2 при контроле методом МПМ располагались напротив ЗТВ с обеих сторон шва.

На рис. 5 приведены результаты контроля методом МПМ тройникового сварного соединения паропровода размером ∅325 × 38 и ∅219 × 25 мм. На рис. 5, *б* показано распределение поля $H_р$ и его градиента dH/dx *1* вдоль сварного шва и отмечена зона KH_{max} *2*, характеризуемая знакопеременным распределением поля $H_р$ с максимальными значениями градиента поля dH/dx по всем трем каналам измерений. В зоне KH_{max} при дополнительном контроле после шлифовки металла шва была выявлена поперечная трещина длиной 20 мм, развивающаяся с наружной поверхности трубы размером ∅219 × 25 мм перпендикулярно шву. При этом максимальное изменение поля и его градиента выявлено по каналу Н1 *3*, расположенному в ЗТВ шва со стороны трубы размером ∅219 × 25 мм (см. рис. 5, *б*).

На рис. 6 представлены результаты сравнительного контроля сварного шва двух пластин из стали 20 длиной 290 мм и толщиной 10 мм методом МПМ и РК. Шов выполнен ручной дуговой сваркой под флюсом. Внизу на магнитограмме отмечены участки с зонами концентрации напряжений, характеризуемые максимальными градиентами поля dH/dx *1—4*. В зоне *3* с максимальными значениями гради-

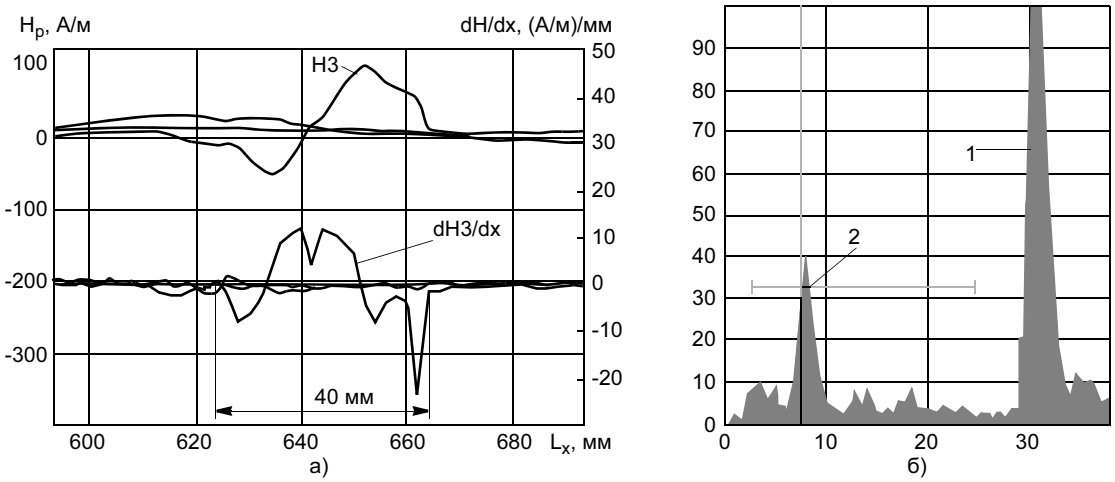


Рис. 3. Результаты контроля участка кольцевого сварного шва химического реактора методом МПМ в зоне KH_{max} (*а*) и диаграмма эхо-сигнала при УЗК прямым ПЭП (*б*): *1* — донный сигнал

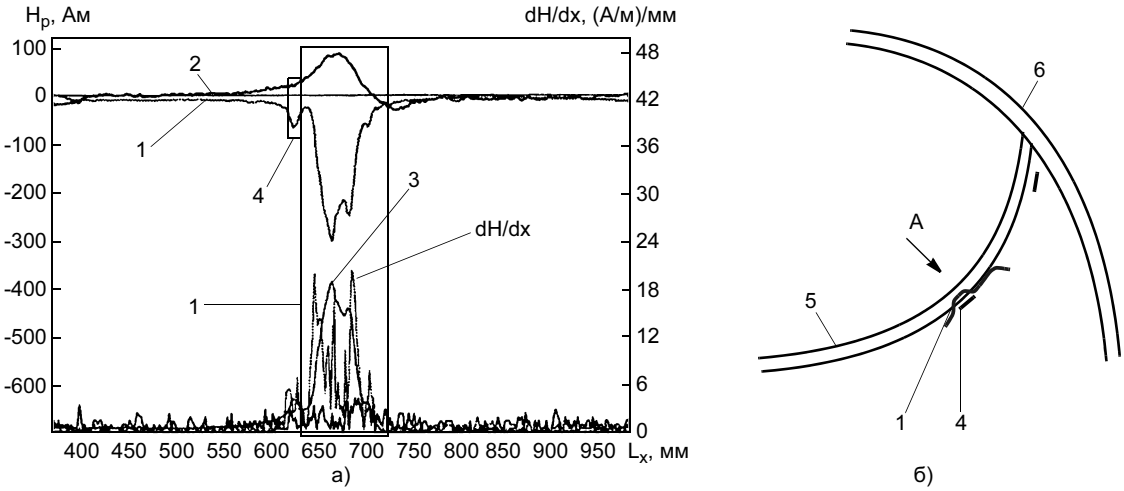


Рис. 4. Результаты контроля радиального сварного шва нижнего днища химического реактора R-701/1 (*а*) и расположение выявленной трещины (*б*): *5*, *6* — радиальный и кольцевой сварные швы

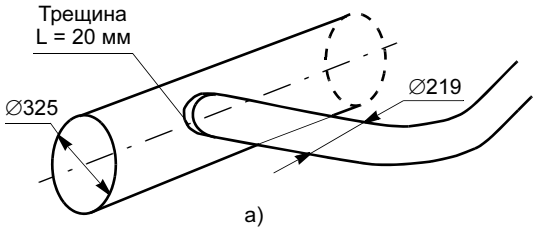
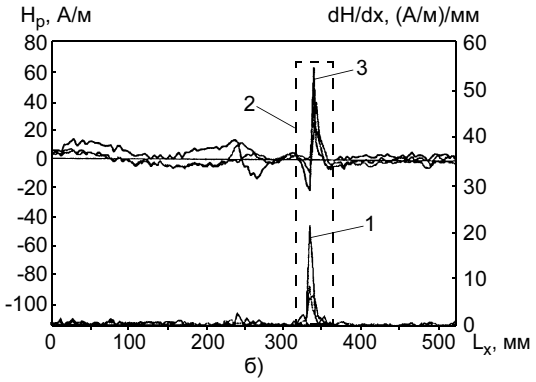


Рис. 5. Тройниковое сварное соединение паропровода (*а*) и распределение поля $H_р$ и его градиента $dH_р/dx$ вдоль сварного шва (*б*)



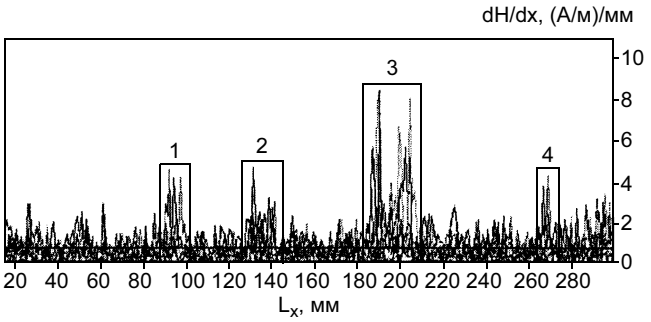


Рис. 6. Результаты контроля сварного шва из двух пластин методом МПМ и РК

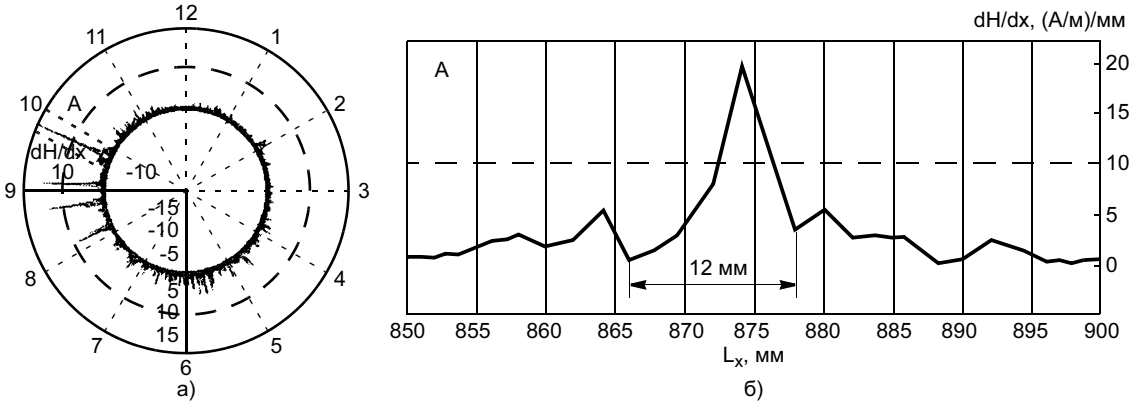


Рис. 7. Результаты контроля поворотного кольцевого сварного стыка № 12—13 магистрального газопровода: *а* — круговая магнитограмма распределения градиента магнитного поля dH_p/dx; *б* — фрагмент распределения градиента поля dH_p/dx в дефектной зоне *А*

ента поля радиационным контролем был выявлен максимальный дефект несплавления, а в зонах *1* и *2* — дефекты в виде мелких пор. В зоне *4* явные дефекты радиационным контролем не выявлены.

На круговой (часовой) магнитограмме рис. 7, *а* приведено распределение градиента поля *dH*/*dx* вдоль периметра кольцевого шва газопровода размером ∅720 × 7 мм. Контроль выполняли по схеме рис. 1. На рис. 7, *б* приведено распределение градиента поля *dH*/*dx* в дефектной зоне *А* по одному каналу измерения, проходящему по центру шва. Ширина сигнала, соответствующая по методу МПМ длине дефекта, составляет 12 мм. По данным радиационного контроля этого шва, в дефектной зоне *А* обнаружен недопустимый дефект типа *Da*10 > 0,1*S* — непровар в корне шва длиной не менее 10 мм.

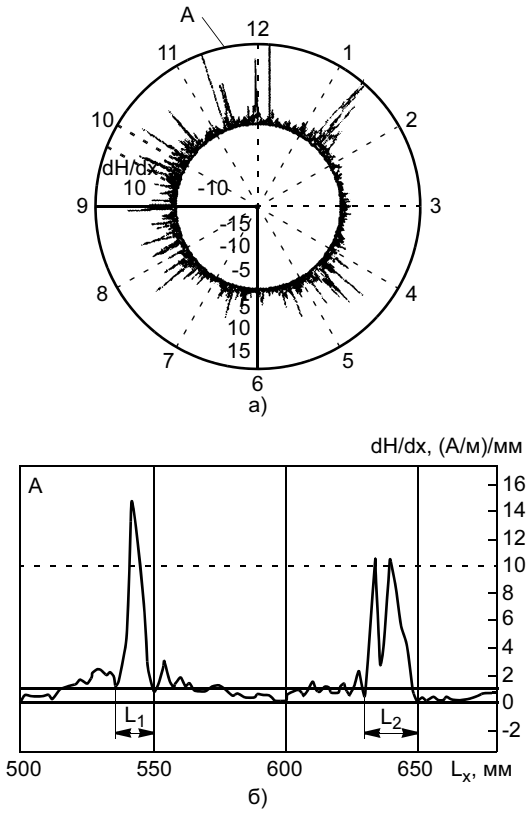


Рис. 8. Результаты контроля монтажного кольцевого сварного стыка № 19—20 магистрального газопровода: *а* — круговая магнитограмма распределения градиента магнитного поля dH_p/dx; *б* — фрагмент распределения градиента поля dH_p/dx в дефектной зоне и расположение дефектов по методу МПМ и РК

На круговой магнитограмме (рис. 8, *а*) представлены результаты контроля другого кольцевого сварного шва газопровода размером ∅720 × 7 мм. Отмечены зоны локального изменения градиента поля *dH*/*dx*, соответствующие по методу МПМ зонам концентрации напряжений. Как правило, в этих зонах другими методами НК выявляются дефекты.

На рис. 8, *б* приведено распределение градиента поля *dH*/*dx* в дефектной зоне *А* по одному каналу измерения, проходящему по ЗТВ сварного шва. Ширина магнитных сигналов, соответствующая по методу МПМ длине дефектов, L_1 = 14 мм и L_2 = 20 мм. По данным РК этого шва, в зоне *А* выявлены недопустимые дефекты типа *Da*10 > 0,1*S* — непровар в корне шва длиной не менее 10 мм.

Следует отметить смещение расположения магнитных сигналов, фиксируемых на поверхности шва, от расположения глубинного дефекта, фиксируемого РК или УЗК. Такое смещение обусловлено тем, что магнитный сигнал соответствует площадкам скольжения, смещенным по глубине шва примерно на 45° относительно максимальной концентрации напряжений от острого края дефекта. Дальнодействующие поля напряжений формируют дальнодействующие границы доменов вдоль площадок скольжения с выходом на поверхность шва в виде локальных изменений магнитного поля и его градиента [2, 3].

Примерный расчет глубины залегания *h* дефектной зоны по методу МПМ проводили с помощью

тригонометрических зависимостей в соответствии со схемой рис. 9:

$$h = \frac{1}{2} l,$$

где l — длина дефекта, определяемая по графику градиента поля.

В соответствии с примером, приведенным на рис. 7 (зона *А*), глубина залегания дефекта h = 6 мм.

На основании выполненного расчета можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов контроля методом МПМ и РК. Как было отмечено выше по данным РК, в зоне *А* на глубине 6—7 мм в корне шва был выявлен непровар длиной 10 мм.

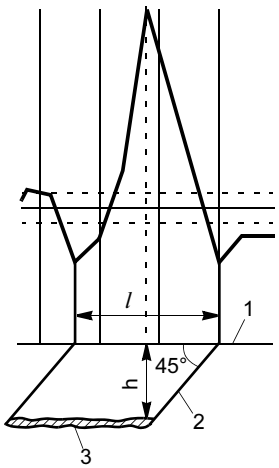


Рис. 9. Схема определения глубины залегания дефекта по методу МПМ: *1* — поверхность контроля; *2* — плоскость скольжения; *3* — непровар

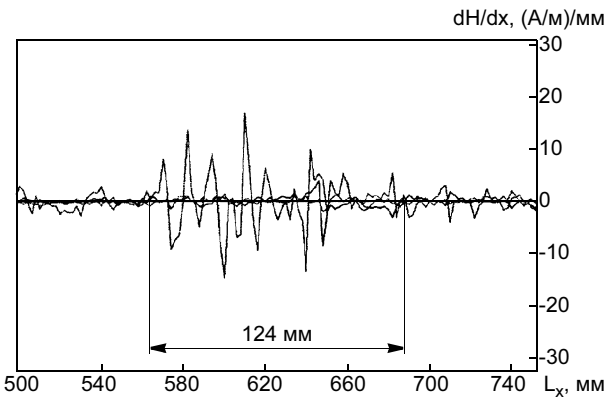


Рис. 10. Распределение градиента поля в зоне непровара по разделке монтажного кольцевого сварного стыка № 12 магистрального газопровода

В случае протяженного дефекта в виде непровара в корне или разделке шва по методу МПМ на поверхности шва фиксируются знакопеременные сигналы градиента поля dH/dx. На рис. 10 приведено распределение градиента поля в зоне непровара по разделке монтажного сварного стыка № 12 магистрального газопровода размером ∅720 × 7 мм. Длина дефектного участка по методу МПМ в этом шве составила 124 мм. По данным РК этого шва, длина непровара по разделке шва составила 130 мм.

В данном примере большое количество магнитных сигналов знакопеременного характера от протяженного непровара в соответствии со схемой рис. 9 обусловлено соответствующим количеством плоскостей скольжения, возникающих в зонах концентрации напряжений на краях дефектной зоны.

Сравнение данных контроля сварных швов газопровода размером ∅720 × 7 мм методом МПМ и РК показали, что сходимость результатов контроля (или выявляемость дефектов) методом МПМ по сравнению с РК колеблется от 70 до 100 %.

Всего на газопроводе размером ∅720 × 7 мм методом МПМ и РК были проконтролированы 17 кольцевых швов и сделан сопоставительный анализ результатов контроля. По результатам анализа комплексного контроля сделаны следующие выводы.

Выявлен высокий уровень сходимости результатов контроля методом МПМ и РК. По количеству дефектов сходимость составила 75 %, а по их расположению — 85 %. Большинство дефектов (80 %), выявленных методом МПМ и рентгеном, оказались расположенными в зоне концентрации напряжений, предварительно зафиксированной методом МПМ.

Несоответствие в результатах контроля по количеству дефектов (~25 %) и по их расположению (~15 %) можно объяснить в определенной степени субъективным фактором, зависящим от подготовки дефектоскописта и различием в физической природе методов МПМ и РК. Метод МПМ слабо реагирует на дефекты, не создающие концентрацию напряжений (поры и шлаковые включения), но такие дефекты не опасны. РК выявляет поры и шлаковые включения независимо от концентрации напряжений. Кроме того, РК, как известно, не выявляет дефекты в виде трещин.

Визуализация и документирование дефектов на магнитограммах в методе МПМ имеет практическое преимущество по сравнению с рентгеновскими пленками.

Учитывая высокую сходимость результатов контроля методом МПМ и РК, целесообразно в дальнейшем применять комплексный контроль. Методом МПМ без какой-либо подготовки поверхности шва в режиме экспресс-контроля выявляются зоны максимальных дефектов и затем в них проводят дополнительный РК.

Практический опыт обследования методом МПМ сварных стыков магистральных газопроводов также показал, что недопустимые по нормам (РК или УЗК) дефекты, возникшие при изготовлении, но без концентрации напряжений, не развиваются в процессе длительной эксплуатации (30 лет и более).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дубов А. А.* Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. М.: Энергоатомиздат, 1995. 112 с.
2. *Власов В. Т., Дубов А. А.* Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ЗАО "ТИССО", 2004. 424 с.
3. *Дубов А. А., Дубов Ал. Ан., Колокольников С. М.* Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: Учебное пособие. М.: ЗАО "ТИССО", 2003. 320 с.

И. В. МОШКИН, А. В. СОЛОВОВ
Самарский аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева

Оптимизация и критерии задачи "Space" САПР "ОРАТ"

Оптимизация — целенаправленная деятельность человека, заключающаяся в получении наилучших результатов в определенных условиях [1].

Оптимизировать — значит найти оптимальный (наилучший) вариант (альтернативу) из множества возможных, анализируемых по критериям сравнения.

Первая задача САПР "ОРАТ" — "Space" определяет оптимальное положение оперируемого объекта в пространстве относительно направления технологического процесса (ТП) его изготовления.

Задачи оптимального проектирования формируются в терминах математического программирования [2]. Согласно этим обозначенным терминам описана поставленная задача проектирования ТП.

Функция цели (целевая функция) *f*(*X*) — поиск пространственного расположения оперируемого объекта (ОО) относительно направления потока технологического процесса, в которое переориентируется ОО из первоначально заданного (какого угодно) расположения.

При исследовании выявлены основные, равные по весомости критерии сравнения пространственных положений ОО:

— критерий минимального расстояния в сторону какой-либо грани ОО от центра тяжести ОО до крайне удаленной точки того же ОО в ту же сторону, назван критерием центра тяжести;

— критерий положения технологической базы, назван критерием базы;

— критерий количества однонаправленных векторных оперирований элементов ОО, требующих поддержки для сохранения своего состояния покоя после присоединения в ОО, назван критерием необходимости сохранения послеоперационного состояния покоя;

— критерий общего количества однонаправленных векторов оперирования элементов, назван критерием концентрации векторов;

— критерий оценки видов оперирования ТП (операций по непосредственному добавлению элементов в подсобранный ОО) и однонаправленных векторов, назван критерием концентрации видов оперирования;

— критерий класса шероховатости;

— критерий суммы векторов по материалу, из которого состоит ОО, назван критерием материала;

— критерий сумм веса элементов ОО по векторам, назван критерием веса;

— критерий максимального габаритного размера ОО, назван критерием максимального размера.

Ниже приведено описание некоторых критериев.

Критерий центра тяжести участвует в сравнении всех 24 пространственных положений ОО относительно друга по тому положению, при котором обеспечивается наибольшая устойчивость ОО в ТП, а также минимум величин силового воздействия на ОО неизбежных нагрузок со стороны операторов ТП [3], чем обеспечиваются в целом экономичность, надежность, требуемая точность оперирования.

Действие критерия центра тяжести (ЦТ) ОО представлено на рис. 1, где R_1, R_2 — минимальное расстояние из центра тяжести ОО до пересечения с плоскостью Q, которой принадлежат крайне удаленные точки K_1 и K_2; S_1, S_2, T_1, T_2 — векторы оперирования с применением силы.

Из рис. 1 следует, что ОО в положении "а" менее устойчив, чем в положении "б". Кроме того, на ОО в положении "а" воздействует больший изгибающий момент вследствие того, что плечо R_1 больше плеча R_2.

Доказывается неравенство $R_1 > R_2$ и неравенство моментов от сил при присоединении элементов:

$$S_1R_1 > S_2R_2; \quad T_1R_1 > T_2R_2.$$

Положение "б" более выигрышное, поскольку эффективнее то положение ОО, при котором минимальное расстояние в сторону какой-либо грани

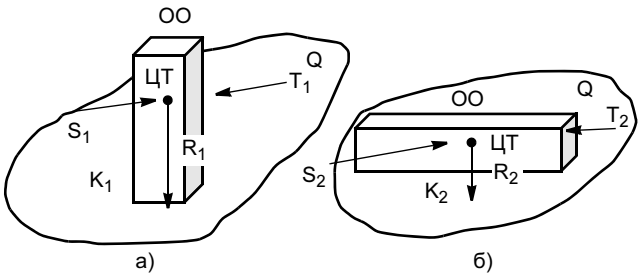


Рис. 1. Действие критерия центра тяжести оперируемого объекта в двух пространственных положениях

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 3

ОО от его же центра тяжести до крайне удаленной точки того же ОО будет меньше.

Критерий базы участвует в сравнении всех 24 положений базового ОО в пространстве относительно друг друга в соответствии с главным направлением ТП по тому положению ОО, при котором технологическая или конструкторская базовая поверхность либо группа баз ОО при расположении ОО на оператор совпадает с какой-либо гранью модели в общей системе координат. Смысл критерия базы состоит в том, что он объявляет более эффективным то пространственное положение ОО, при котором расположение базового ОО на операторе при лишении его степеней свободы предполагает минимум затрат на:

— оперирование;

— проектирование оператора лишения степеней свободы, в которое устанавливают базовый ОО;

— повышение точности оперирования.

При оперировании любого ОО вектором "сверху вниз" сила гравитации, т. е. вес ОО, является "помощником", а при других направлениях вектора установки — источником дополнительных составляющих для оперирования в ТП. Самым лучшим, идеальным расположением базового ОО на операторе для установки его векторным направлением является положение "сверху вниз", после чего он чаще всего принимает устойчивое положение; не требует поддерживания в определенном состоянии после выполнения ТП.

При установке сбоку на оператор базового ОО требуется более сложная конструкция оператора для лишения свободы и транспортной системы перемещения ОО от одного рабочего места к следующему. Установка базового ОО "снизу вверх" самая неэффективная, если рассматривать полный комплекс операторов, до настоящего времени сконструированных конструкторами. При ручных работах, аналогично, трудоемкость оперирования на оператор лишения ОО свободы "сверху вниз явно меньше, чем оперирование сбоку, тем более, чем "снизу вверх".

Критерий необходимости сохранения послеоперационного состояния покоя участвует в сравнении всех 24 положений ОО относительно друг друга в соответствии с направлением ТП по тому положению, при котором нет необходимости обеспечивать сохранение состояния покоя присоединяемых ОО, т. е. когда нет необходимости поддерживать (придерживать) ОО после их присоединения до закрепления с помощью других ОО или приспособлением. Критерий распространяется на все виды оперирования, исключая случаи, когда ОО находится в состоянии относительного покоя и не требует поддерживания. Такими видами оперирования, например, являются операции запрессовывания (касается всех ОО), операции завинчивания (касается элементов крепежа — болтов, гаек, винтов и др., рассматриваемых как элементы присоединения).

Суммы количеств явлений, когда ОО требуют силу для поддержания в необходимом состоянии до закрепления, сравниваются при различных пространственных положениях ОО. Выигрывает пространственное положение с минимальным количеством данных явлений.

Например, положение, при котором ОО устанавливаются с зазором "сверху вниз" на базовый ОО более выигрышное, чем положение того же базового ОО, при котором те же ОО устанавливаются "снизу вверх".

Все присоединяемые элементы вектором "снизу вверх" требуют поддерживания до закрепления, иначе под действием собственного веса они после устранения из зоны рабочего органа оператора, упадут вниз или несколько изменят свое необходимое послеоперационное положение. Это нежелательно, а порой и недопустимо, с точки зрения точности и эффективности оперирования. Например, установка с зазором с вектором "справа налево" при простом наложении ОО явно менее эффективна, чем та же операция с тем же ОО при направлении вектора "сверху вниз". Не требует никаких доказательств тот факт, что положение "а" (рис. 2) более выигрышное, чем положение "б".

Критерий концентрации векторов участвует в сравнении ОРСП ОО по тому положению базового ОО, при котором количество однонаправленных векторов оперирования ОО в ТП максимальное. Например, при сравнении двух положений одного и того же ОО предпочтительнее то положение, у которого нет векторов оперирования, направленных снизу вверх, а количество векторов оперирования, направленных сверху вниз, максимально больше.

Критерий концентрации векторов существенно различает различимые положения ОО в отношении трудоемкости оперирования ОО, сложности конструкции операторов автоматизированного ТП.

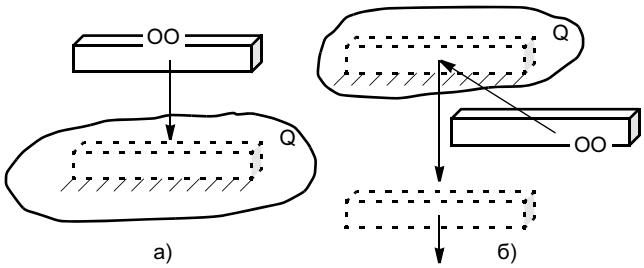


Рис. 2. Действие критерия необходимости сохранения послеоперационного состояния покоя

Влияние критерия концентрации векторов не требует доказательств, так как его действие видно без какого-либо анализа. Действие именно этого критерия отмечают многие разработчики проектирования технологий [4].

Критерий концентрации видов оперирования аналогичен критерию концентрации векторов. Участвует в сравнении ОРСП ОО по тому положению, при котором наблюдается явление минимальной суммы баллов оценки видов оперирования однонаправленного векторного направления при оперировании.

Например, при сравнении пары положений ОО предпочтительнее то, у которого суммарная оценка — величина, равная сумме произведений единиц операций на их соответственный балл, "снизу вверх" будет меньше, а "сверху вниз" — больше. В отличие от критерия концентрации векторов критерий концентрации видов оперирования оценивает количество векторных направлений с учетом вида оперирования.

Критерий концентрации видов оперирования требует анализа операций ТП по непосредственному оперированию ОО в базовый ОО в отношении их сравнительной трудоемкости. Результаты и ход исследования требуемого анализа трудоемкости представляют на примере сборочного процесса.

Известна распространенность основных видов операций присоединения, на которые необходимо обратить внимание при определении коэффициентов весомости величин трудоемкости.

Все остальные виды операций присоединений элементов относятся к более сложным видам, так как состоят из нескольких переходов и не могут состоять из одного перехода самого процесса присоединения, в частности:

— сварка — установка ОО (с поддержкой или без нее) + сварка ОО под действием межатомных сил;

— завальцовывание, клепка, обжатие и др. — установка ОО + операция геометрического замыкания за счет пластического деформирования ОО;

— склеивание — установка ОО + нанесение перед этим клея + ожидание конца процесса адгезионного сцепления ОО.

Из сложного набора работ по присоединению какого-либо ОО всегда можно выделить часть непосредственного присоединения ОО, которая названа "чистой частью". Остальное (без "чистой части") в работе по присоединению названо "сопроводительной частью" оперирования. Так, у операции установки смазанного маслом ОО "чистая часть" — установка после смазки, "сопроводительная часть" (сопутствующая) — смазка ОО перед присоединением. Аналогично у операции клепки "чистая часть" — установка элемента, "сопроводительная часть" — пластическое деформирование головки заклепки.

Сопроводительные части основных видов операций присоединения ОО различны по трудоемкости и не поддаются формализации трудоемкостной весомости при сравнении между собой с точки зрения векторного направления оперирования, поэтому дальнейшее определение коэффициентов весомости трудоемкости операций при соединении ОО ведут приближенно, с учетом наличия сопроводительных частей в том случае, если отделение последних — явление отрицательное или невозможное в отношении эффективности распределения операций ТП по его последовательности.

Коэффициенты весомости величин трудоемкости "чистых частей" оперирования при присоединении ОО в объект рассчитаны для двух случаев присоединения:

— присоединяемый ОО входит в подсобранный ОО;

— присоединяемый ОО охватывает подсобранный ОО.

Для расчета коэффициентов на основе формул определения трудоемкости сборочных работ в общемашиностроительных нормативах разработаны формулы, по которым производят анализ.

Экспериментальные работы задачи "Space" доказали адекватность действия выявленных критериев логики мышления технолога-проектировщика.

Проектные переменные для каждого критерия сравнения всех 24 возможных квазипараллелепипедных пространственных расположений ОО относительно направления ТП представлены в таблице.

Ограничения — зависимости, определяющие предельные значения характеристик всех возможных 24 пространственных квазипараллелепипедных расположений оперируемого объекта в пространстве относительно направления ТП, являются запретами векторного направления оперирования. Эти ограничения вызывают соответственное изменение приоритета важности пространственной относительности при сравнении сторон ОО как граней абстрактной модели решения поставленной задачи.

Метод оптимизации. Обзор методов оптимизации и их анализ с целью применения к решению поставленной задачи определили подходящий метод — поисковый — направленный поиск — метод детерминированного поиска [2], так как компоненты нормированного вектора поиска формируются по заранее установленному правилу — главного приоритета основных векторных направлений оперирования при осуществлении операций какого-либо процесса.

Элементы случайности в решении затронутой задачи вообще отсутствуют, поэтому метод случайного поиска неуместен. Имеет смысл поиск гло-

Критерий	Проектные переменные	Допустимая область переменных
Критерий центра тяжести	1. Величина расстояния-перпендикуляра (в любой единице измерения длины) от центра тяжести ОО до крайне удаленной от него точки ОО в сторону вектора "сверху" 2. То же, в сторону вектора "справа" 3. То же, в сторону вектора "слева" 4. То же, в сторону вектора "назад" 5. То же, в сторону вектора "вперед" 6. То же, в сторону вектора "снизу"	Конечная величина — 6
Критерий базы	1. Логическая величина ("истина" либо "ложь") наличия базовой поверхности у ОО со стороны вектора "сверху" 2. То же, в сторону вектора "справа" 3. То же, в сторону вектора "слева" 4. То же, в сторону вектора "назад" 5. То же, в сторону вектора "вперед" 6. То же, в сторону вектора "снизу"	То же
Критерий необходимости сохранения послеоперационного состояния покоя	1. Логическая величина ("истина" либо "ложь") наличия необходимости придерживать элемент после окончания операции	Количество переменных равно количеству элементов в исследуемом ОО
Критерий концентрации векторов	Комплект логических величин: 1. Логическая величина ("истина" либо "ложь") вектора оперирования в сторону ОО — "сверху" 2. То же, "справа" 3. То же, "слева" 4. То же, "назад" 5. То же, "вперед" 6. То же, "снизу"	Количество комплектов переменных равно количеству элементов в исследуемом ОО
Критерий концентрации видов оперирования	Комплект расчетных параметров Штрафной балл равен штрафному баллу соответственно виду операции ... если вектор "истина"	То же
Критерий материала	Комплект расчетных параметров Штрафной балл равен штрафному баллу соответственно материалу, из которого изготовлен элемент ОО ... если вектор "истина"	Количество расчетных параметров равно количеству элементов в исследуемом ОО
Критерий веса	Комплект расчетных параметров Штрафной балл равен весу элемента ... если вектор "истина"	То же
Критерий максимального класса точности	Комплект расчетных параметров Штрафной балл равен коду максимального класса шероховатости какой-либо поверхности элемента ОО ... если вектор "истина"	“ “
Критерий максимального габаритного размера	Комплект расчетных параметров Штрафной балл равен какому-либо максимальному габаритному размеру элемента ОО ... если вектор "истина"	Количество расчетных параметров равно количеству элементов в исследуемом ОО

бального экстремума (абсолютного экстремума), используя исходные данные каждого из локальных критериев сравнения пар основных векторных направлений.

Обзор отечественной и зарубежной литературы выявил отсутствие каких-либо критериев сравнения вариантов пространственного расположения ОО относительно направления потока ТП. Таким образом, идея определять пространственное расположение ОО относительно направления потока ТП в мировой практике проектирования технологических процессов является пионерской.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Попов Д. Р.* Разработка и оценка варианта планировки автоматической линии при машинном проектировании. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МОССТАНКИН, 1980. 474 с.
2. *Соловов А. В., Мрыкин С. В., Колпащиков А. Г.* Оптимизация. Комплекс по математическим методам оптимального проектирования: Метод. указания. Самара: Самарский аэрокосмический ун-т, 1994. 52 с.
3. *Мошкин И. В.* Методические указания по анализу изделия сборки на его оптимальное положение в пространстве относительно направления потока технологического процесса. Павлодар: ПКТИАМ; НПО "Сборочных механизмов", 1987.
4. *Храбров А. С.* Совершенствование процессов автоматизации сборочных работ. Л.: Машиностроение, 1979. 230 с.

Контроль состояния и диагностика машин ТРЕБОВАНИЯ К ОБУЧЕНИЮ И СЕРТИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА Ч. 1. Требования к органам по сертификации и процедурам сертификации (ГОСТ Р ИСО 18436-1–2005)

Задачи, основные принципы и правила проведения работ по государственной стандартизации в Российской Федерации установлены ГОСТ Р 1.0—92 "Государственная система стандартизации Российской Федерации. Основные положения" и ГОСТ Р 1.2—92 "Государственная система стандартизации Российской Федерации. Порядок разработки государственных стандартов".

Стандарт подготовлен ОАО "Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем" на основе собственного аутентичного перевода стандарта ИСО 18436-1:2004. Внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 183 "Вибрация и удар". Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 мая 2005 г. № 139-ст. Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 18436-1:2004 "Контроль состояния и диагностика машин. Требования к обучению и сертификации персонала. Ч. 1. Требования к органам по сертификации и процедурам сертификации" (ISO 18436-1:2004 "Condition monitoring and diagnostics of machines — Requirements for training and certification of personnel — Part 1: Requirements for certifying bodies and the certification process").

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты. Введен впервые. **Дата введения 2006—01—01**.

Контроль состояния и диагностика являются составной часть эффективной программы технического обслуживания машин. Технологии безразборной оценки состояния и обнаружения повреждений включают в себя методы вибрационного анализа, инфракрасной термографии, анализа смазки, акустического и ультразвукового анализа, анализа параметров тока двигателя. Во многих случаях эти методы успешно дополняют друг друга. Ключевым элементом в применении указанных технологий являются квалификация и опыт лиц, выполняющих измерения и интерпретирующих их результаты.

Настоящий стандарт устанавливает требования к органам по сертификации персонала в области контроля состояния и диагностики машин, а также персоналу этих органов. Требования к персоналу, выполняющему работы по контролю состояния и диагностике машин, установлены в других стандартах серии ИСО 18436.

1. Область применения

Настоящий стандарт устанавливает требования к органам по сертификации персонала, занятого в области контроля состояния и диагностики машин, а также процедуры сертификации этого персонала. Требования настоящего стандарта дополняют требования ИСО/МЭК 17024.

Вопросы сертификации для разных технологий контроля состояния и диагностики машин рассмотрены в других стандартах серии ИСО 18436.

2. Нормативная ссылка

В настоящем стандарте использована нормативная ссылка на следующий стандарт:

ИСО/МЭК 17024:2003 Общие требования к органам системы сертификации персонала.

3. Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО/МЭК 17024, а также следующие термины с соответствующими определениями.

3.1. **Сертификат** (certificate): письменный документ, выданный в подтверждение того, что его обладатель удовлетворяет требованиям, установленным в соответствующем стандарте серии ИСО 18436 для выбранной технологии контроля состояния и диагностики машин.

3.2. **Орган по сертификации** (certification body): организация, удовлетворяющая требованиям ИСО/МЭК 17024 к органам по сертификации.

3.3. **Экзаменационный центр** (examination centre): центр, уполномоченный и контролируемый органом по сертификации, где происходит процедура приемки письменных или практических экзаменов.

3.4. **Наблюдатель** (invigilator): лицо, руководящее проведением письменного экзамена, который является частью процедуры сертификации персонала, но не участвующее в оценке компетентности кандидата.

3.5. **Технический комитет** (technical committee): комитет, организованный органом по сертификации для решения технических вопросов в области сертификации.

3.6. **Значительный перерыв в деятельности** (significant interruption): неучастие лица в деятельности, относящейся к данной области сертификации, в течение непрерывного периода времени длительностью более 365 дней или нескольких периодов времени, чья суммарная длительность превышает две пятых срока действия сертификата.

4. Орган по сертификации

4.1. Права

Орган по сертификации осуществляет управление деятельностью в области сертификации, в том числе всеми процедурами, призванными продемонстрировать соответствие квалификации кандидата требованиям соответствующего стандарта серии ИСО 18436, конечной целью которых является получение кандидатом пись-

менного свидетельства с подтверждением его квалификации.

4.2. Обязанности

Орган по сертификации должен:

— удовлетворять требованиям стандартов серии ИСО 18436;

— удовлетворять требованиям ИСО/МЭК 17024, раздел 4;

— располагать необходимыми административными ресурсами для проведения экзаменов и руководить экзаменационными центрами;

— быть независимым от чьих-либо коммерческих интересов;

— исключать любые элементы дискриминации в проводимой политике и процедурах управления системой сертификации;

— руководствоваться в своей деятельности положениями законов и международных соглашений.

4.3. Общие правила деятельности

Получение сертификата соответствия не должно быть сопряжено с необоснованными ограничениями для кандидата, например, чрезмерными финансовыми обязательствами, требованиями прохождения обучения в конкретной организации или членства в какой-нибудь ассоциации. Однако, как правило, для признания кандидата соответствующим заданным требованиям от него требуют прохождения установленного курса обучения.

Не должно существовать ограничений на число лиц, сертифицированных по данной категории.

Орган по сертификации несет ответственность за выдачу, поддержание, обновление, расширение или ограничение области действия сертификатов, а также за их аннулирование.

4.4. Ответственность

Орган по сертификации должен:

— устанавливать, поддерживать и развивать процедуры сертификации для демонстрации квалификации персонала в выполнении задач по контролю состояния и диагностике машин, результатом чего является выдача письменного свидетельства с подтверждением данной квалификации;

— управлять процессами сертификации в соответствии с требованиями настоящего стандарта и контролировать соблюдение норм этики (см. приложение А), включая применение при необходимости санкций к держателям сертификатов;

— нести полную ответственность за установленные процедуры аттестации, включая технические и административные требования к этим процедурам;

— обеспечить соблюдение программы обучения положениям соответствующего стандарта серии ИСО 18436;

— уполномочивать экзаменационные центры, укомплектованные соответствующим персоналом и оборудованием, на проведение работ в системе сертификации и осуществлять периодический контроль их деятельности;

— разрабатывать или утверждать экзаменационные вопросы;

— осуществлять допуск кандидатов к экзаменам;

— назначать время и место проведения экзаменов, экзаменационный центр, экзаменаторов и наблюдателей, ответственных за проведение экзаменов;

— составлять программу проведения экзаменов экзаменационными центрами;

— получать материалы экзаменов и оценивать их результаты;

— извещать кандидатов о результатах экзаменов;

— выдавать письменные сертификаты;

— вести реестр выданных сертификатов;

— обеспечивать проверку результатов экзаменов по письменным апелляциям кандидатов;

— разрабатывать и применять процедуры и требования к повторной сертификации;

— контролировать выполнение всех функций, делегируемых другим лицам и организациям.

4.5. Организационная структура

Организационная структура органа по сертификации должна быть общедоступна, обеспечивать вовлечение в его работу всех заинтересованных лиц и удовлетворять требованиям ИСО/МЭК 17024.

4.6. Экзаменационные центры

4.6.1. Общие положения

Экзаменационные центры, которые могут быть созданы, например, на основе технических организаций, поставщиков оборудования или независимых обучающих организаций, должны удовлетворять требованиям п. 4.6.2 и нести ответственность по п. 4.6.3.

4.6.2. Обязанности

Экзаменационные центры должны быть уполномочены органом по сертификации и удовлетворять по меньшей мере следующим требованиям:

— работать под управлением органа по сертификации;

— иметь квалифицированный персонал, позволяющий организовать проведение квалификационных экзаменов;

— иметь достаточные технические и финансовые ресурсы для организации и проведения экзаменов;

— руководствоваться положениями настоящего стандарта.

4.6.3. Ответственность

Экзаменационный центр должен:

— проводить экзамены согласно установленной органом по сертификации процедуре с участием уполномоченных наблюдателей (см. приложение В);

— использовать при проведении экзаменов только последнюю версию тестовых заданий, предоставленную органом по сертификации;

— возвращать тестовые задания (включая не использованные в процессе экзаменов) в орган по сертификации;

— не допускать появления ситуаций, каким-либо образом компрометирующих процедуру экзаменов.

4.7. Технические комитеты

4.7.1. Общие положения

Технические комитеты назначаются органом по сертификации и должны удовлетворять требованиям п. 4.7.2 и нести ответственность по п. 4.7.3.

4.7.2. Обязанности

Орган по сертификации формирует отдельные технические комитеты для решения разного рода технических вопросов, связанных с сертификацией. Технические комитеты должны иметь в своем составе членов, чья квалификация соответствует уровню, который представляет технический комитет.

4.7.3. Ответственность

Технический комитет должен:

— разрабатывать и обновлять экзаменационные вопросы (тестовые задания);

— четко придерживаться области знаний, определенных соответствующим стандартом серии ИСО 18436, для каждого уровня сертификации.

5. Персонал органа по сертификации

5.1. Общие требования

Чтобы обеспечить эффективность и единообразие процедур сертификации аккредитованный орган по сертификации должен установить требования к компетентности своего персонала и утвердить эти требования ответственным комитетом (см. ИСО/МЭК 17024).

Орган по сертификации подписывает со своими сотрудниками (штатными или внештатными) письменный контракт или другой документ, согласно которому те принимают на себя обязательства по выполнению правил, установленных органом по сертификации, включая правила, связанные с вопросами конфиденциальности и независимости от материальных и иных интересов, а также от предыдущих и настоящих взаимоотношений с кандидатами на получение сертификата, которые по мнению заинтересованных сторон могли бы скомпрометировать беспристрастность органа сертификации в принятии своих решений.

Персоналу должны быть доступны инструкции, где четко изложены его обязанности и ответственность за выполнение этих обязанностей. Инструкции должны быть актуализированы. Все лица, вовлеченные в деятельность по сертификации, должны обладать соответствующим образованием и техническим опытом, пройти инструктаж, организованный органом по сертификации, и ясно осознавать роль процесса сертификации.

На каждого сотрудника орган по сертификации заводит дело, в котором поддерживают в актуализированном состоянии все записи относительно квалификации сотрудника, пройденного им обучения и опыта работы в области сертификации. Записи в деле должны быть доступны сотруднику и включать в себя:

— имя и адрес по месту жительства сотрудника;

— дату зачисления и занимаемую должность;

— образование и профессиональный статус;

— опыт работы и дополнительное обучение в каждой из областей деятельности органа по сертификации;

— конкретные обязанности, возложенные на сотрудника;

— оценку выполнения сотрудником своих обязанностей;

— дату последнего обновления записей.

5.2. Дополнительные требования для экзаменаторов

Орган по сертификации устанавливает для экзаменаторов требования на основе соответствующих стандартов и других нормативных документов.

При выборе экзаменаторов для проведения экзамена (целиком или в какой-то его части) орган по сертификации должен быть уверен в их компетентности. Экзаменатор должен:

— хорошо разбираться в правилах работы системы сертификации;

— знать методы проведения экзамена и связанную с ними документацию;

— иметь соответствующие технические знания в той области, в которой проводят экзамен;

— иметь возможность общения — в письменной или устной форме (при необходимости через переводчика) — на языке проведения экзамена;

— не иметь каких-либо личных интересов, которые могли бы поставить под сомнение беспристрастность и объективность его оценок.

Орган по сертификации должен принимать все меры, чтобы не допустить компрометации процедуры и результатов экзаменов. Если обстоятельства вынуждают орган по сертификации приглашать для проведения экзаменов преподавателей обучающих курсов, то такой преподаватель не может принимать экзамены с участием своих учеников. В начале экзамена кандидату вручают запечатанный конверт с экзаменационными вопросами, а после его окончания кандидат возвращает — также в запечатанном виде — свои ответы наблюдателю, который не принимает непосредственного участия в оценке кандидата.

6. Сертифицируемый персонал

6.1. Общие положения

Кандидат может в зависимости от своей компетентности претендовать на получение сертификата одной из категорий по соответствующему стандарту серии ИСО 18436. Демонстрацию компетентности осуществляют в соответствии с требованиями этого стандарта.

6.2. Категории

Рекомендуется для каждой технологии диагностирования и контроля состояния устанавливать три категории сертификации — начальную, среднюю и высшую — в зависимости от сложности вопросов, рассматриваемых специалистом данной категории. С повышением категории сложность возрастает. При необходимости число категорий для конкретной технологии может быть увеличено или уменьшено.

6.3. Работодатель

Работодатель направляет заявление в орган по сертификации с просьбой о допуске кандидата к участию в процедуре сертификации и подтверждает достоверность представленных кандидатом сведений (включая информацию об обучении и опыте работы), необходимых для его допуска к экзаменам. При этом работодатель не может быть вовлечен непосредственно в процесс сертификации. Работодатель несет полную ответственность за допуск своих сотрудников к работам в области контроля состояния и диагностики машин, а также за качество и достоверность результатов этих работ. Если кандидат не является работником по найму, на него самого ложится вся ответственность работодателя.

7. Допуск к экзаменам

7.1. Общие положения

Свидетельством понимания кандидатом принципов и методов соответствующей технологии диагностирования и контроля состояния машины является наличие у него необходимого образования, опыта работы и прохождение им курса дополнительного обучения по специальности.

7.2. Уровень образования

Каждый стандарт серии ИСО 18436, посвященный одной из технологий контроля состояния и диагностики, устанавливает требования или рекомендации к уровню образования для каждой категории, например: среднее, среднее техническое или высшее.

7.3. Дополнительное обучение по специальности

Каждый стандарт серии ИСО 18436, посвященный одной из технологий контроля состояния и диагностики, устанавливает требования или рекомендации к минимальной длительности дополнительного обучения. Обучение может проводиться в форме лекций, демонстраций или практических занятий. Темы курса обучения и предъявляемые требования приведены в приложении к каждому стандарту. В сводной таблице указано количество часов

обучения для каждой категории и основные учебные темы. Эти учебные темы затем детализированы с разбивкой по часам для каждой категории сертификации.

В приложениях стандартов серии ИСО 18436 приведены рекомендуемые источники технической информации для каждой категории.

Дополнительное обучение включает в себя прохождение экзаменов, чтобы убедиться в усвоении учебного курса. Кандидат должен представить в орган по сертификации свидетельство успешного прохождения учебных курсов, которое могло бы убедить орган по сертификации в том, что:

— им успешно пройден курс обучения или самообразования по темам, указанным в соответствующем стандарте серии ИСО 18436;

— количество часов обучения по каждой теме соответствует тому, которое установлено в приложении к соответствующему стандарту серии ИСО 18436;

— пройденное обучение соответствует категории сертификации, на которую претендует кандидат;

— в случае самообразования у него имеется документированное подтверждение самостоятельного обучения по соответствующим темам, в противном случае кандидат должен представить свидетельство о прохождении экзаменов в учебном центре, признаваемом органом по сертификации.

7.4. Опыт работы

Чтобы быть допущенным к процедурам сертификации, кандидат должен предъявить письменное свидетельство наличия необходимого опыта работ в данной области контроля состояния и диагностики. В каждом стандарте серии ИСО 18436 установлены минимальные требования к опыту работы.

8. Квалификационные экзамены

8.1. Типы и содержание экзаменов

В ходе квалификационного экзамена кандидату, претендующему на присвоение определенной категории, предстоит ответить на ряд вопросов в течение установленного времени. Во время экзаменов кандидату не разрешено пользоваться книгами и справочниками, однако по усмотрению органа по сертификации ему может быть разрешено пользоваться таблицами формул или справочных данных. Допускается проведение части экзамена в устной или практической форме в зависимости от требований соответствующего стандарта серии ИСО 18436.

Подробные требования к экзаменам устанавливают в соответствующем стандарте серии ИСО 18436. Экзаменационные вопросы, относящиеся к тематике каждого стандарта серии ИСО 18436, берут из общей базы данных, актуализированной на день проведения экзамена. Вопросы должны носить практический характер, но в то же время позволять оценить способность кандидата применять основные концепции и принципы в области контроля технического состояния машин. Такие вопросы могут включать в себя задания по интерпретации графиков и диаграмм, требовать выполнения простых математических расчетов.

8. 2. Проведение экзаменов

Экзамены проводят в месте, определенном органом по сертификации, в соответствии со следующими требованиями:

— во время экзамена кандидат должен иметь при себе документ, удостоверяющий личность, и извещение об участии в экзамене, которые он предъявляет по требованию наблюдателя;

— во время экзамена не разрешено пользоваться книгами, справочниками и другими материалами, за исключением разрешенных органом по сертификации (например таблицей общеупотребительных формул); орган по сертификации может допустить использование книг и справочных пособий во время экзаменов на высшую категорию сертификации;

— кандидат должен иметь в своем распоряжении простой чертежный инструмент и калькулятор с математическими функциями (непрограммируемый);

— кандидату запрещено отвечать на вопросы карандашом и использовать корректирующую жидкость; все поправки, внесенные кандидатом в экзаменационный лист, должны быть завизированы его подписью;

— в начале экзамена каждый кандидат получает от наблюдателя запечатанный конверт с экзаменационными вопросами, на котором указано имя кандидата;

— по указанию наблюдателя кандидат должен вскрыть конверт и начать отвечать на вопросы;

— после завершения экзамена каждый кандидат помещает экзаменационные листы в специально полученный для этого конверт, запечатывает его, подписывает своим именем и передает наблюдателю, который затем направляет все конверты в орган по сертификации;

— кандидат, нарушивший правила или уличенный в каком-либо мошенничестве в ходе проведения экзамена, отстраняется от дальнейшего участия в экзаменах (см. также п. 8.4).

8.3. Критерии успешной сдачи экзамена

Лицо, назначенное органом по сертификации, подсчитывает число правильных ответов, данных каждым кандидатом. Для получения сертификата процент правильных ответов должен быть не ниже установленного проходного балла. Результат, показанный каждым кандидатом, является строго конфиденциальной информацией.

8.4. Переэкзаменовка

Кандидат, чей результат оказался ниже проходного балла, может держать экзамены повторно неограниченное число раз при условии, что интервал между экзаменами составляет не менее 30 дней. Орган по сертификации может сократить период между экзаменами, если за это время кандидат пройдет дополнительное обучение, признанное органом по сертификации достаточным. Кандидат, отстраненный от участия в экзамене по причине неэтичного поведения, может подать заявку на повторное участие в экзаменах не ранее чем через 12 мес.

9. Сертификаты

9.1. Выдача сертификатов

После того как кандидат продемонстрировал соответствие требованиям выбранной категории, орган по сертификации оповещает его об успешном прохождении процедуры сертификации и выдает сертификат с подтверждением категории по соответствующему стандарту серии ИСО 18436.

9.2. Реквизиты сертификатов

Сертификат или заменяющее его удостоверение должны содержать как минимум:

— полное имя владельца сертификата;

— дату выдачи сертификата;

— срок действия сертификата;

— указание категории сертификации;

— указание области сертификации, например "вибрационный контроль состояния и диагностика машин";

— наименование органа по сертификации, выдавшего сертификат;

— уникальный персональный идентификационный номер;

— подпись владельца сертификата (на удостоверении);

— фотографию владельца сертификата (на удостоверении);

— подпись (на сертификате) представителя органа по сертификации;

— печать органа по сертификации.

Удостоверение должно быть защищено от фальсификации (например ламинированием).

На сертификате или удостоверении может быть предусмотрено специальное место, где указывают ограничения использования сертификата и где ставят подпись и печать работодателя, допускающего владельца сертификата к работе.

Примечание. Выдавая сертификат, орган по сертификации подтверждает тем самым квалификацию владельца сертификата, но не уполномочивает его на проведение работ, связанных с измерением и анализом вибрации машин.

10. Срок действия и обновление сертификата

10.1. Срок действия сертификата

Срок действия сертификата (удостоверения) не должен превышать пяти лет с момента выдачи. Сертификат становится недействительным до завершения установленного срока действия в следующих случаях:

— владелец сертификата становится физически или психически неспособным выполнять свои обязанности;

— в случае обнаружения органом по сертификации нарушения норм этики со стороны владельца сертификата.

10.2. Возобновление сертификата

В период за шесть месяцев до истечения срока действия сертификата последний может быть возобновлен органом по сертификации на новый срок при условии, что владелец сертификата сможет продемонстрировать качественность выполненных им работ за период действия сертификата при отсутствии значительных перерывов в деятельности. В противном случае процедуру сертификации необходимо пройти заново в качестве кандидата.

11. Документация

Орган по сертификации должен вести и хранить следующие документы:

— реестр лиц, получивших сертификаты по каждой из категорий;

— дело на каждого кандидата, не прошедшего процедуру сертификации, в течение по крайней мере трех лет после последнего заявления на прохождение сертификации или прохождения экзамена;

— дела на лиц, получивших сертификаты, а также на тех, чьи сертификаты были аннулированы, содержащие: заявление на прохождение сертификации; экзаменационные документы, включая экзаменационные вопросы и проверочные листы; документы, необходимые для возобновления сертификата, включая свидетельства непрерывной успешной деятельности и данные о значительных перерывах в деятельности; причины аннулирования сертификата.

Личное дело должно храниться в надлежащих условиях в соответствии с требованиями ИСО/МЭК 17024 (п. 4.6).

12. Переходный период

В начале введения системы сертификации орган по сертификации может назначать экзаменаторов на срок не более пяти лет, если те удовлетворяют следующим требованиям:

— имеют необходимые знания в области контроля состояния и диагностики машин;

— имеют практический опыт участия в работах по контролю состояния и диагностике машин;

— могут проводить экзамены;

— понимают смысл экзаменационных вопросов и могут оценить результаты экзаментов.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

Нормы этики

Лица, получившие сертификат по одному из стандартов серии ИСО 18436, должны принять на себя обязанность следовать признанным на международном уровне принципам персональной ответственности и профессиональной компетентности. Согласно этим принципам сертифицированные специалисты должны:

— выполнять свои профессиональные обязанности с должным учетом конкретных условий работы, вопросов безопасности, сохранения здоровья и благополучия населения;

— выполнять измерения и анализ только в пределах своей компетентности, обусловленной пройденным обучением и опытом работы, и при необходимости привлекать или давать рекомендации по привлечению к участию в работах специалистов, чье участие позволит выполнить задание полностью и с требуемым качеством;

— осознавать свою ответственность за результаты выполняемой работы и повышать свою квалификацию, участвуя в выставках, семинарах, общаясь с коллегами и заказчиками и используя опыт их деятельности;

— защищать, насколько это возможно без ущерба благополучию населения, от разглашения информацию, переданную на конфиденциальных условиях работодателем, заказчиками, коллегами по работе и другими лицами;

— воздерживаться от необоснованных заявлений и действий, которые могли бы дискредитировать систему сертификации, основанную на настоящем стандарте;

— сообщать работодателю и заказчику о нежелательных последствиях, которые могут повлечь решения, принятые ими на основе советов, рекомендаций или указаний лиц, некомпетентных в техническом отношении;

— избегать столкновения интересов с работодателем и заказчиком, но если такие конфликты все же возникают в ходе выполнения работ, незамедлительно информировать об этом всех затрагиваемых данными конфликтами лиц;

— принимать меры по поддержанию своего технического уровня и быть в курсе последних достижений в области методов измерений и анализа данных с целью оценки технического состояния машин.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Квалификация наблюдателей и экзаменаторов

Экзаменаторы должны иметь высшую категорию или категорию по крайней мере на одну ступень выше той, на которую проводится экзамен. Орган по сертификации может также самостоятельно принимать решение о назначении экзаменатора, даже если претендент не удовлетворяет вышеуказанному требованию. Все экзаменаторы и наблюдатели подписывают соглашение о том, что им известны установленные правила проведения экзаменов, которым они обязуются неукоснительно следовать.

Ссылка на данный материал не допускается.

С. М. КУРБАТОВ, д-р техн. наук, вице-президент Союза работодателей машиностроения, Россия,
И. А. ГАСПАРИШВИЛИ, консультант компании PriceWaterHauseCoopers (США)

Социальная и экологическая отчетность как инструмент повышения эффективности системы управления компанией

С переходом к рыночным отношениям и обретением экономической самостоятельности для большинства российских предприятий резко возросла экономическая и социальная ответственность за результаты своей деятельности. Необходимость сохранения устойчивости собственного бизнеса и его развития в долгосрочной перспективе вызывает стремление предприятий ко все более активному поиску адекватных механизмов адаптации к изменившимся условиям рыночной среды. Еще одним движущим фактором этого поиска являются выход российских компаний на зарубежные рынки, первичное размещение акций на ведущих мировых биржах, скупка производственных и других физических активов в иностранных государствах и вступление России в ВТО.

Все перечисленные процессы требуют от отечественных товаропроизводителей совершенствования и повышения эффективности системы корпоративного управления для удовлетворения разнообразных требований и нормативов, предъявляемых иностранными институтами, организациями и государствами, а также для повышения конкурентоспособности и инвестиционной привлекательности. Так, в исследовании компании McKinsey за 2002 г. "Глобальный опрос мнения инвесторов", отмечается, что 80 % ведущих мировых инвесторов готовы вкладывать дополнительные средства в компании с эффективной системой корпоративного управления. Причем, размер возможных дополнительных инвестиций варьируется от 11 % применительно к канадским компаниям до 38 % применительно к российским предприятиям [1]. Эти данные подтверждают, что мировые финансовые институты ожидают от российских предприятий внедрения современных инструментов и методов управления и в случае их внедрения готовы оказать им помощь в дальнейшем совершенствовании.

Одним из ключевых элементов эффективной системы корпоративного управления является концепция корпоративной социальной ответственности (КСО), в соответствии с которой развиваются современные системы экологического менеджмента, управления социальными отношениями, взаимодействия с заинтересованными сторонами и т. д. Концепция КСО предполагает, что "компания берет на себя целый ряд обязательств по улучшению экологической и социально-экономической обстановки в регионе и, что крайне важно, добровольно устанавливает собственные нормы и стандарты, являющиеся более строгими, чем нормативы, установленные государством" [2].

Внедрению идей КСО в сознание руководства компаний способствует фактор повышения конкурентоспособности предприятия вследствие признания его "экологического и социального благополучия". Современная реальность такова, что в цивилизованном обществе борьба за потребителя переместилась из области цен на качественно новый уровень, где определяющими аспектами становятся этические принципы производства и потребления товара, а политика организации строится исходя из долгосрочной перспективы существования не только самого бизнеса, но и общества в целом.

Стремление к созданию в России социально-ориентированной рыночной экономики, открытой внешнему миру и тесно интегрированной в мировую экономическую систему требует от отечественных товаропроизводителей принятия международных правил экологически ориентированного делового поведения. Особенности современного уникального положения России на пути перехода от плановой экономики к рыночной позволяют использовать лучшую мировую практику в области управления природоохранными, социальными и экономическими аспектами, накопленную годами, и, избежав многих ошибок, наладить эффективную систему управления, минимизировать негативное влияние на окружающую среду, внести вклад в решение ряда социальных задач и, как следствие, улучшить качество жизни населения.

Современная концепция КСО включает ряд инструментов, направленных на повышение эффективности системы экологического и социального менеджмента предприятий. Одним из основополагающих инструментов концепции является инструмент социальной отчетности.

Социальная отчетность — это систематический сбор, документирование, анализ и публичное обсуждение экономической, социальной и природоохранной деятельности компаний. Основная задача отчетности с точки зрения бизнеса (в классическом определении) состоит в увеличении детальности и объема предоставляемой компанией информации для ее последующего анализа руководством компании и ее акционерами [3].

Изначально отчетность компаний была направлена на информирование своих акционеров о финансовых показателях и перспективах экономического роста предприятий. С развитием концепции КСО и ее проникновением в систему управления компаниями методы отчетности стали применяться для описания социальных программ, а с развитием концепции устойчивого развития и ее взаимосвязи с концепцией КСО предприятия стали предоставлять информацию о своей природоохранной деятельности и эффективности систем экологического менеджмента в форме соответствующих отчетных документов. Круг адресатов этой отчетности также расширился и стал включать не только акционеров компаний, но и различные заинтересованные стороны.

С точки зрения вопросов устойчивого развития, особый интерес представляет развитие системы экологической отчетности, т. е. добровольного информирования заинтересованных сторон об успехах, проблемах и основных тенденциях в системе управления природопользованием.

Развитие системы экологической отчетности можно условно подразделить на три основных этапа.

Первый этап (70—80-е гг. XX века). На этом этапе были сделаны попытки включить в ежегодную корпоративную отчетность экологическую информацию. Социальные отчеты, выходившие в эти годы, включали небольшие и довольно разнородные разделы, в которых содержались обещания компаний повлиять на улучшение экологической ситуации в будущем. Эти разделы не были связаны напрямую с непосредственной деятельностью той или иной компании. Дж. Т. Марлин, описывая эти разделы, применяет термины "рекламные акции" и "дезинформация". В то же время в эти годы появилось несколько документов, в которых прослеживалось желание руководства компаний предоставить конкретную информацию о природоохранной деятельности своих предприятий и основным экологическим характеристикам и связать эти показатели с общими финансовыми показателями деятельности. Одним из таких отчетов был отчет компании Abt & Associates (1972 г). По мнению Дж. Т. Марлина, этот документ можно назвать "пионерским и уникальным" в своем роде [4]. Концепция социальной ответственности в отчете компании Abt & Associates была напрямую привязана к загрязнению воздушной среды и водных объектов. Тем не менее, финансовый аудитор, проводивший верификацию отчета, отказался подтверждать предоставленную информацию по причине отсутствия каких бы то ни было аудиторских стандартов в области охраны окружающей среды.

Второй этап (1989—1998 гг.). Этот этап фактически начался с отчета компании Ben & Jerry (1989 г.), руководство которой поручило независимому аудитору совместно со своим персоналом работу над отчетом за 1988 г. Компания предоставила аудитору безоговорочное право проводить любые интервью с работниками предприятий в любое время, как в дневную, так и в ночную смену. Помимо основных объектов аудитор проверил и поставщиков компании Ben & Jerry. На основе полученной информации был подготовлен отчет, который было предложено назвать отчетом для заинтересованных сторон. В этом документе было предложено разделить заинтересованные стороны на несколько основных категорий: местные сообщества, персонал, потребителей, поставщиков и инвесторов. Впоследствии к отчету было добавлено дополнительное независимое аудиторское заключение, подтверждающее правдивость и точность предоставленной информации.

Третий этап (1998 г. — настоящее время). На этом этапе окончательно закрепилась необходимость проверки отраженной в отчете информации третьими сторонами и была введена практика верификации отчетов институтами со специально делегированными правами в области проведения сертификации на соответствие социальным и экологическим стандартам. Глобальным лидером в области проверки отчетности в этот период становится организация "Международная социальная отчетность (МСО)", основанная в 1997 г. Уже в 1998 г. она провела проверку завода компании Avon в штате Нью-Йорк на соответствие своему новому стандарту по предоставлению информации заинтересованным сторонам. Наряду с МСО первооткрывателями в этой сфере стали Лесной попечительский совет, Международная федерация органического земледелия и Датский Фонд Макса Хавелаара ("Честная конкуренция"). Впоследствии эти институты объединились и сформировали организацию Международная социальная и экологическая аккредитация и индикация (МСЭАИ).

Несмотря на проверку завода Avon в 1998 г. на соответствие новым правилам составления отчетности, первым крупным целостным корпоративным отчетом, который был верифицирован по новым правилам, стал отчет нефтяной компании Shell за 2001 г. В 2002 г. два представителя так называемой "Большой Четверки" — ведущих аудиторских фирм мира — KPMG и Pricewaterhouse Coopers подписали совместное заявление о проверке отчета компании Shell.

В последние несколько лет практика составления социальных и экологических отчетов получила широкое распространение. Для оценки успехов компаний в составлении отчетности применяются разнообразные индексы и критерии: Dow Jones Sustainability Index, Yale Environmental Sustainability Index и т. д. Сегодня большинство отчетов составляются в соответствии с международным стандартом ГИО (глобальная инициатива по отчетности). Этот стандарт основан на системе показателей, которые необходимо включить в отчетный документ; показатели объединены в несколько групп, отражающих такие характеристики компании, как экономическая, социальная и экологическая эффективность деятельности. Помимо этого, в отчете должна присутствовать информация касательно общего видения компании и ее стратегии в области социальной ответственности/устойчивого развития, существующих систем управления и применяемых стандартов, взаимодействия с заинтересованными сторонами и наличия системы оценки рисков. Непременным условием составления отчета является предоставление информации о том, были ли достигнуты в течение года цели, поставленные компанией перед собой в начале отчетного периода, и указание основных целей на следующий год. Одним из ключевых показателей является наличие независимого аудиторского заключения, подтверждающего правильность и целостность данных, публикуемых в соответствующем отчете.

Благодаря внедрению системы социальной и экологической отчетности общество получает действующий инструмент, позволяющий контролировать фактическую деятельность компании, а компания, в свою очередь, получает возможность подтвердить выполнение взятых на себя обязательств и улучшить свою репутацию в глазах заинтересованных сторон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Global* Investor Opinion Survey: Key Findings. McKinsey& Company, 2002.
2. *Windsor D.* The future of corporate social responsibility // International Journal of Organization Analysis. 2001. N 9 (3).
3. *McWilliams A., Siegel D.* Profit-maximizing corporate social responsibility // Academy of Management Review. 2001.
4. *Marlin J. T.* History of Environmental Reporting in CSR // Business Respect. 2003. Vol. 51.

В. С. НЕДОБОЙ, аспирант
"МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского

Современные технологии в управлении предприятием

Введение

Автоматизированные системы управления предприятием впервые применили в области, где человеческий труд был невозможен. В основном это было связано с агрессивной окружающей средой (высокой температурой, сильной загазованностью и т. п.), где устанавливали приборы, дистанционно снимающие показания с датчиков для управления исполнительными механизмами.

В основном это были пневматические и гидравлические системы, которые обладали большой инерционностью, т. е. время отклика на воздействия измерялось несколькими десятками секунд. При этом решались задачи локального управления. Отчеты о ходе процесса регистрировались на бумажном носителе. Анализ проводился вручную на основе предыдущего накопленного опыта.

Применение электронных систем сдерживалось их ненадежностью. Основой для создания систем управления технологического оборудования служили ЭВМ класса СМ и ЕС с модулями удаленного ввода/вывода. Данные системы применялись в основном для контроля (индикации) параметров в связи с тем, что малейшая неисправность в работе ЭВМ приводила к потере всех данных, обрабатываемых машиной. Замена неисправных модулей производилась только после отключения ЭВМ от электропитания, с потерей всех данных о процессе. Все это позволяло использовать ЭВМ для создания систем управления технологическими процессами.

Толчком к бурному развитию электронных систем управления послужила разработка микропроцессоров и сетевых протоколов и оборудования на их основе. Появилась возможность децентрализовать функции управления, осуществить функцию так называемого горячего резервирования оборудования и программного обеспечения. При этом значительно возросла надежность систем управления.

Электронные системы управления на базе распределенных сетей начали применять для управления технологическими процессами в начале 80-х годов. Их применение позволило в значительной степени реализовать модели как базового управления, так и улучшенного управления "advanced control", подразумевающего многосвязанное управление несколькими технологическими объектами. Начали создавать автоматизированные системы управления технологическими процессами с использованием моделей оптимального управления.

В конце 80-х годов первые электронные системы управления производственными технологическими процессами класса DCS (Distributed Control Systems) стали поступать на российские предприятия в составе комплексных поставок технологического оборудования импортного производства. Преимущества, которые они имели по сравнению с традиционными — надежность, несложность в обслуживании, информативность, — были сразу же оценены эксплуатационным персоналом. Подобные системы стали закупать для реконструируемых объектов, обычно для основных технологических установок на предприятии. Качество работы систем управления стало в большей степени определяться полевыми приборами, работающими с данными системами, поскольку интеллектуальный потенциал и надежность, заложенные в этих системах, значительно перекрывали потребности. При этом преобладал технический аспект внедрения систем управления.

Одновременно бурное развитие получило внедрение систем управления финансовой деятельностью предприятия на базе распределенных сетей и персональных компьютеров.

Остро встал вопрос, как передать истинные данные с технологических установок на уровень управления финансово-хозяйственной деятельностью предприятия, а заодно и решить проблемы внутризаводского баланса и управления производством. Данная задача решалась и решается в настоящее время внедрением систем диспетчерского управления на базе появившегося в начале 90-х годов нового класса распределенных систем управления SCADA.

Можно констатировать, что такие системы разработаны концептуально. Их эффективность подкреплена наличием на рынке аппаратных и программных средств для реализации в полном объеме задач, связанных с управлением производством. Выявились лидеры рынка поставки систем управления технологическими процессами как аппаратных средств, так и программных. Наличие межсистемных стандартных протоколов позволяет создавать системы управления любой сложности вне зависимости от производителя программных и аппаратных средств. Создание эффективных систем АСУТП из плоскости технической перешло в плоскость экономическую.

Предприятия реального времени

Инвестиции предприятий различного профиля в информационные технологии растут год от года, однако не всегда дают ожидаемый результат. Сегодня уже очевидно, для чего необходимо внедрение современных SCADA и ERP систем. Более того, делаются попытки идти дальше по этому пути, а именно интеграции АСУТП и АСУП для построения так называемых предприятий реального времени. Предприятие реального времени — это организация, которая получает конкурентные преимущества, используя информацию для своевременного устранения задержек в управлении и выполнении критических для бизнеса процессов. В силу сложности производственного цикла сумма небольших потерь может приводить к серьезным потерям. В условиях жесткой конкуренции даже небольшая оптимизация технологических процессов может дать существенный выигрыш перед конкурентами. Подобные интегрированные системы позволяют снизить стоимость сопровождения, оптимизировать производственные процессы и экономическую эф-

фективность производства, а с помощью анализа архивных данных можно выявлять и идентифицировать простои оборудования.

В настоящее время основной задачей является получение данных о себестоимости продукции, затратах на производство не в конце недели или месяца, а в реальном времени. Такие проблемы актуальны для многих предприятий как на Западе, так и в России. Все дело в несогласованности данных АСУТП и АСУП, которая, в свою очередь, является следствием их неодинаковой природы. Необходимо иметь возможность передавать в ERP-систему подготовленные данные, причем зачастую требуются обобщенные данные по всему предприятию или крупному подразделению. А это в подавляющем большинстве случаев означает, что получены они будут с систем автоматизации разных производителей или с физически удаленных объектов.

Данные АСУТП специфичны. Они, как правило, могут быть представлены в виде временных рядов время — значение, они часто и быстро меняются, их удобно представлять в виде графиков, но из них неудобно делать выборки по различным не временным критериям.

В АСУП, наоборот, работает настоящая реляционная модель. Данные статичны, связаны многими отношениями, должны быть легко выбираемы по различным сложным критериям. И, конечно, никого на этом уровне не интересует подробная информация о колебаниях уровня или температуры, или времени включения и отключения насоса. Пользователи ERP-системы хотят знать, сколько стоит простой оборудования за текущую смену и общая продолжительность простоев за смену, сутки, месяц, год, сколько электроэнергии было потрачено на определенный технологический процесс и каков суммарный объем отгруженной продукции.

Пути внедрения

Для достижения максимального экономического эффекта, наибольшей функциональности и надежности в работе систем дистанционного управления инженерными системами необходимо максимально полно интегрировать программно-аппаратные комплексы предприятия в единую систему на базе центра обработки данных. Данное направление развития автоматизированных систем управления инженерными комплексами подразумевает поэтапную замену, модернизацию, дополнение существующих комплексов и внедрение центра обработки данных, выполняющего интеграционную функцию этой глобальной системы. При этом сохраняется возможность автономной (локальной) работы каждой из систем для работы в режимах отладки или в аварийных ситуациях. Но максимальная функциональность, надежность и эффективность комплекса автоматизированных систем будут достигнуты при согласованной работе различных систем в едином механизме.

Предполагаемая архитектура системы

Очевидно, что в основе интегрированной системы должен быть специализированный центр обработки данных, ориентированный на обработку и хранение больших объемов данных реального времени из различных источников. Клиентские приложения должны давать возможность предоставления информации в требуемом виде и формате. То есть необходимо, чтобы система поддержки принятия технологических решений отбирала и обрабатывала данные из разнородных источников, а затем представляла их в едином ключе. Интерфейс такой системы должен быть простым и легко настраиваемым, стандартным, знакомым и интуитивно понятным. В последнее время все более востребованы тонкие Web-клиенты, которые позволяют обойтись без установки специального программного обеспечения на рабочие места пользователей системы.

Информация от первого уровня датчиков и исполнительных механизмов на второй уровень — локальные SCADA — системы должна поступать напрямую с одного или нескольких распределенных узлов контроллеров по промышленной сети. Локальные SCADA должны выполнять функцию хранения данных, которая позволяет им храниться локально в случае потери связи с сервером. Кроме того, локальные SCADA должны позволять локальное (местное) управление для проведения регламентных работ, а также в случае отказа основного диспетчерского управления. Набор перечисленных функций систем SCADA обеспечивает надежный механизм управления, доставки и хранения данных.

Для автоматизации на нижнем — первом — уровне предполагается использовать контроллеры, связанные по сети и выполняющие функции непосредственной выдачи управляющих заданий на оборудование, управление приводами, преобразователями ток-напряжение и др. Второй уровень предполагается реализовать на базе SCADA-системы. Функции этого уровня системы должны заключаться в выдаче заданий нижнему уровню (локальном управлении), сборе данных о производстве, технологическом процессе, генерации аварий по событиям, выдаче информации о токовых режимах, задании параметров выполнения команд и др.

Встроенный OPC-сервер на данном (втором) уровне производит сбор данных с любого сервера. При этом OPC-сервер является самостоятельным источником данных и позволяет передавать данные между различным оборудованием. Данные могут транслироваться в форматах XML, SQL/OLE DB/ODBC databases (MS Access, MS SQL 2000 and Oracle) Microsoft Excel (97/2000). Передача данных в формате Oracle осуществляется по ODBC с использованием SQL-тегов или XML. Такой механизм обеспечивает надежную доставку данных, так как введен временный локальный архив в случае обрыва связи с сервером базы данных (БД) реального времени с последующей автоматической передачей данных при восстановлении связи.

На третий уровень, который должен выполнять интеграционную роль, информация от различных автоматизированных систем второго уровня при помощи OPC-серверов должна поступать в БД реального времени. Все OPC-серверы должны быть синхронизированными по времени для синхронизации данных внутри БД, например при помощи временных меток, получаемых от GPS источника. Временная синхронизация позволит сопоставлять данные от разных источников и с высокой точностью устанавливать последовательность событий в системе.

Специальное приложение должно циклически опрашивать БД и передавать данные для подсистемы их визуализации. В подсистеме визуализации при изменении состояния какого-либо контролируемого объекта должно происходить изменение визуального отображения объекта или группы объектов. Все группы объектов должны выводиться в виде мнемосхемы, условно воспроизводящей производственные технологические процессы предприятия, например аэропорта. Кроме этого, должна быть возможность обратной связи — передачи управляющих команд с помощью интерфейса, предоставляемого подсистемой визуализации (виртуальные кнопки) через OPC-серверы к конечным устройствам.

Подсистема визуализации в зависимости от прав конкретного пользователя должна предоставлять отображение только определенных участков мнемосхемы и данных. Возможность управления технологическими процессами должна предоставляться строго только авторизованными пользователями с соответствующими правами в системе. Доступ к подсистеме визуализации должен осуществляться через интерфейс web — browser.

Из БД реального времени данные должны поступать в масштабируемый центр обработки данных, который позволит создавать хранилища с практически неограниченным количеством переменных. Данный центр должен иметь распределенную, отказоустойчивую конфигурацию. С помощью специальных модулей в центре будут обрабатываться статистические данные, которые позволят создать систему контроля качества, мониторинга и управления безопасностью системы, в которой будет реализована возможность анализа влияния отдельного оборудования, человеческого фактора и др. Данный модуль должен стать важной составляющей сложной системы управления технологическими процессами аэропорта с большим техническим парком. В общем смысле функцией третьего уровня должны стать сбор информации обо всех процессах, протекающих на технологических участках, управление складами, управление транспортной системой аэропорта, выполнение задачи планирования и управления производством. Другая важная задача третьего уровня — анализ отказоустойчивости интегрированных комплексов с предсказанием уязвимых точек системы, задолго до того как они смогут катастрофическим образом повлиять на предприятие, на основе совокупности множества данных. При этом будут выдаваться рекомендации по предотвращению аварийных ситуаций с выдачей возможных последствий при принятии каждого из решений.

При этом должны обеспечиваться:

- удобная работа с данными, хранящимися в центральной БД;
- автоматическая запись тревожных сообщений в реляционную базу данных;
- работа с настраиваемыми технологическими параметрами, также сохраняемыми в БД;
- передача информации о производстве из БД в ERP о времени, затраченном на отдельно взятый технологический процесс, режимах работы оборудования и др.;
- формирование и отображение аварийных сообщений и сигнализации;
- отображение ретроспективных данных;
- выборочное отображение данных как в табличном, так и графическом виде с построением трендов;
- отображение состояния работы агрегата и устройств с возможностью масштабирования;
- схематическая прорисовка всего установленного оборудования по участкам так, чтобы было возможно легко и оперативно найти интересующую информацию;
- создание и удаление архивов и их резервных копий и управление ими;
- создание точки опроса вручную;
- возможность просмотра сообщений и предупреждений.

С помощью тонких Web-клиентов, предназначенные для визуализации и анализа данных из архива системы, должны осуществляться:

- получение запрашиваемых данных по определенным параметрам;
- организация трендов по фазам технологического процесса, прочим критериям и событиям;
- просмотр трендов, построенных по параметру;
- запись и просмотр комментариев пользователя;
- отображение динамически вычисляемых параметров (минимума, максимума, среднего);
- конфигурирование для каждого пользователя определенного набора экранов визуализации, а также панели навигации;
- отображение на графике зависимости одного параметра от другого;
- динамическая подмена группы параметров на тренде;
- наложение трендов или стек трендов по определенной оси;
- помещение на экраны гиперссылок на другие экраны и Web-страницы.

А. П. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, В. И. ГАЛКИН, д-р техн. наук,
В. С. СОКОЛОВ, канд. техн. наук
"МАТИ" – РГТУ им К. Э. Циолковского

Практика непрерывной информационно-компьютерной подготовки студентов-технологов

Информационные технологии являются одним из важнейших факторов развития современного общества. В сфере производства информационные технологии реализуются на принципах CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support — непрерывное развитие и поддержка жизненного цикла изделия). Основной смысл CALS-технологий заключается в повышении конкурентоспособности продукции за счет эффективного управления информационными ресурсами. Это достигается благодаря преобразованию жизненного цикла изделия в высокоавтоматизированный процесс, интегрированный с точки зрения информационного взаимодействия всех его участников. Острая конкуренция заставляет западные и ведущие отечественные фирмы ускоренными темпами внедрять CALS-технологии. Поэтому для успешного развития отечественной промышленности требуется огромное количество специалистов, которые помимо знаний в своих базовых областях овладели теоретическим и практическим опытом работы с современными информационными технологиями. В связи с этим производство выдвигает дополнительные требования, предъявляемые в области информационно-компьютерной подготовки к выпускникам технических вузов.

Внедрение CALS-стандартов на производстве привело к поиску новых решений в концепции подготовки специалистов в МАТИ: открытию новых специальностей и образованию новых факультетов. Традиционное для МАТИ обучение специалистов в области конструкторско-технологической подготовки было дополнено открытием новых кафедр, охватывающих стадию эксплуатации и сопровождения систем ("Стартовые комплексы", "Технология эксплуатации воздушных судов", "Высшая инженерная экологическая школа"), а также кафедр, осуществляющих подготовку технологов и механиков с углубленным изучением информационных технологий ("Информационные технологии", "Технологии интегрированных автоматизированных систем", "Интернет-технологии", “Космические телекоммуникации").

Экономический факультет и его кафедры вывели МАТИ на стадию маркетинговых исследований, укрепление подготовки в области организации производства и финансового менеджмента, управление качеством и сертификацию продукции.

Образование факультета прикладной математики, механики и информатики было связано с открытием новых специальностей, обеспечивающих углубленную подготовку специалистов-исследователей.

Постоянная и планомерная работа по совершенствованию образовательных программ, учебно-методического и организационного обеспечения, выполняемая ведущими преподавателями и специалистами предприятий, обеспечила построение гибкой развивающейся образовательной системы подготовки специалистов, нацеленной на удовлетворение потребностей конкретных предприятий с учетом требований их научных и производственных подразделений. Это достигается системным подходом разрешения проблем целевой подготовки специалистов, основанным на комплексном анализе всех ее аспектов. При этом фундаментальная и специальная подготовка в полной мере отражают приоритетные

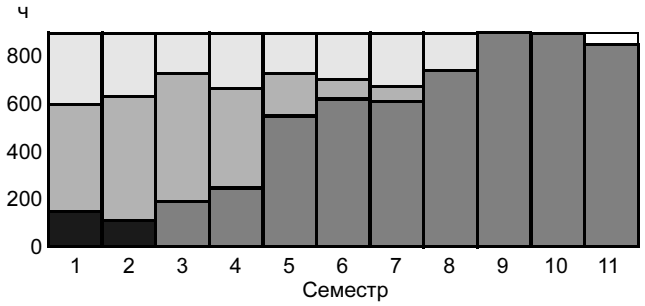


Рис. 1. Структура базового учебного плана инженеров-технологов (■ — информационные технологии — 17 %; ■ — профессиональная подготовка — 43 %; □ — естественные науки — 23 %; □ — гуманитарные и социальные науки — 17 %)

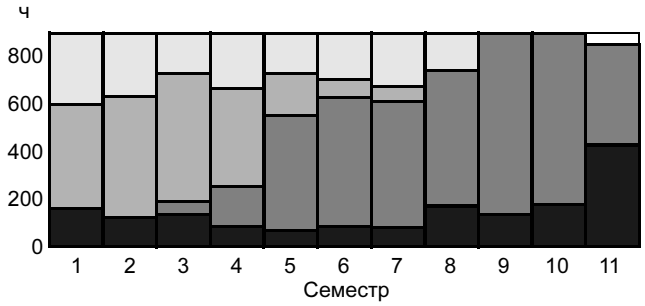


Рис. 2. Преобразованный учебный план инженеров-технологов (обозначения — см. рис. 1)

Название дисциплины	Учебный семестр	Комментарий
Информатика	1—2	Знакомство с Microsoft Office, алгоритмическое программирование. Выравнивание уровня знаний у студентов
	3—4	Совершенствование работы с продуктами Microsoft Office, программирование на Visual Basic
Применение вычислительной техники в инженерной деятельности	5—6	Знакомство с инженерными графическими системами, системами математического моделирования, основы сетевых технологий. Применение вычислительной техники в курсовом проектировании по базовым предметам
Методология научных исследований	6	Эффективное применение численных методов с помощью вычислительной техники
Базы данных	7—8	Знакомство с моделями БД, изучение реляционных БД, разработка собственных БД, изучение автоматизации в Microsoft Office
Математическое моделирование технологических процессов	8	Основы аналитических и численных методов моделирования, изучение методов конечных элементов и конечных разностей. Практическое применение CAE-систем
Автоматизация технологических процессов	9	Знакомство с АСУП, изучение принципа работы плат ЦАП—АЦП
САПР	9—10	Изучение идеологии CALS. изучение и практическое применение методов инжиниринга и реинжиниринга, CAD/CAM/CAE/PDM-систем, разработка учебной CAM-системы

образовательные направления России и развитых зарубежных стран. Все это в полной мере соответствует потребностям предприятий, остро нуждающимся в молодых специалистах, в совершенстве владеющих современными производственными и информационными технологиями.

Однако в настоящее время, согласно образовательному стандарту, обязательными предметами, непосредственно связанными с информационными технологиями, у студентов инженерных специальностей являются информатика, которая изучается в двух семестрах первого курса, и САПР, изучаемая на четвертом либо пятом курсе, что составляет 3 % от общего объема дисциплин учебного плана (рис. 1).

Подобный порядок вещей не способствует формированию у студентов целостной системы знаний и базовых понятий в информационно-компьютерной области. Для получения студентами системных знаний в этой сфере требуется обеспечение комплексности образования. Это может быть достигнуто благодаря внедрению в учебный процесс непрерывного блока информационно-компьютерных дисциплин объемом до 17—20 % от общего количества, который может быть сформирован в рамках образовательного стандарта за счет дисциплин по выбору и перераспределению нагрузки между предметами (рис. 2). Дисциплины информационно-компьютерного блока должны обладать взаимной преемственностью и быть равномерно распределены по всему циклу обучения. Для формирования у студентов нацеленности на решение повседневных задач с применением компьютерной техники разработка дисциплин информационно-компьютерного блока должна обеспечивать реализацию межпредметных связей с учебными курсами специальных, общепрофессиональных, математических, естественно-научных и других дисциплин с внедрением компьютерных технологий при их введении.

Перечень дисциплин, связанных с информационными технологиями, в учебном плане технологических специальностей приведен в таблице.

Перечень и содержание дисциплин, подлежащих изучению, должны уточняться для каждой конкретной специальности, однако в этот состав должны быть включены следующие обязательные дисциплины: графические системы, базы данных, системы математического моделирования, основы инжиниринга и реинжиниринга, сетевые технологии, программирование. В качестве примера в таблице приведены дисциплины, связанные с информационными технологиями, которые составляют единый учебный блок в учебном плане ряда технологических специальностей. Аналогичные учебные планы разработаны для ряда экономических специальностей. Подобным образом поступают в Институте целевой подготовки специалистов МАТИ при ФГУП "ММПП "Салют".

Решение кадровой проблемы для предприятий зависит не только от изменения учебных планов и методик обучения. Важнейшим фактором привлечения молодых специалистов на производство является повышение их материальной заинтересованности. Предприятиям стоит пересмотреть свои позиции в кадровом вопросе, сконцентрировав свое внимание не на количестве принимаемых сотрудников, а на качестве их подготовки. Этому способствуют прямые договорные отношения с вузами. Кроме того, каждое предприятие использует свой состав программного обеспечения, и обучение студентов по стандартной программе не позволяет на "выходе" получить специалиста, полностью соответствующего требованиям конкретного производства. Следовательно, необходима дополнительная подготовка молодых специалистов под требования предприятия. Этой цели служит хорошо себя зарекомендовавшая система целевой контрактной подготовки, в соответствии с которой разрабатывается и подписывается трехсторонний контракт между предприятием-заказчиком, студентом и вузом-исполнителем. Однако масштабы привлечения этого механизма пока недостаточно значительны, что, безусловно, тормозит привлечение кадров на производство.

Содержание зарубежных журналов[1]

Cutting Tool Engineering (N 9, Vol. 57, 2005, США)

Резьбонарезная головка для обработки медицинских изделий, с. 82, ил. 1.

Головка производства фирмы GST Tooling Corp. (США) предназначена для нарезания резьб на винтах, используемых в ортопедических и стоматологических изделиях. В корпусе устанавливают шесть индексируемых режущих пластин, прошлифованных по условиям заказчиков. Каждая пластина имеет три режущие кромки с покрытием TiAlN. Головку можно использовать на различных приспособлениях для вихревой обработки.

Сборные торцовые фрезы для обработки вертикальных стенок, с. 82, ил. 1.

Для получения точных вертикальных стенок фирма Kennametal предлагает сборные торцовые фрезы Mill 1 Max со ступенчатым цилиндрическим корпусом и твердосплавными режущими пластинами. Фрезы эффективно работают при частоте вращения до 25 000 мин$^{-1}$ и глубине резания до 38,1 мм. Радиус при вершине режущих пластин выбирают от 0,3 до 64 мм. Корпус фрезы балансируется при частоте вращения 10 000 мин$^{-1}$.

Устройство для очистки СОЖ, с. 83, ил. 1.

Устройство Turbo-Separator T40-2 фирмы Sanborn Technologies (США) предназначено для автоматического отделения твердых частиц размером от 1 до 10 мкм с помощью центрифуги, причем фильтры при этом не используются. Перерабатываются 151 л СОЖ в 1 мин, а за 1 ч отделяются частицы общей массой 20 кг. Частицы выделяются сухими и пригодными для дальнейшего использования.

Концевые фрезы малого диаметра, с. 88, ил. 1.

Фирма Greenleaf предлагает в табличной форме информацию о фирменных концевых фрезах малого диаметра. Приведены сведения о следующих режущих пластинах для фрез: треугольных и квадратных с положительным передним углом, круглых с положительным и отрицательным передним углом, а также данные о режимах фрезерования закаленных материалов и фотографии корпусов и режущих пластин инструментов.

(N 10, Vol. 57, 2005, США)

Режущие пластины для фрез для обработки в труднодоступных местах, с. 14, ил. 1.

Для эффективного фрезерования карманов, черновой обработки выступов и выемке в формах, торцевого чернового фрезерования, обработки наклонных поверхностей и винтовой интерполяции фирма Dapra Corp. (США) выпустила серию пластин для фрез Toroid. Новые пластины обеспечивают обработку при подаче до 15,2 м/мин. Эти пластины обеспечивают контурную обработку, прорезание пазов, ступенчатое и врезное фрезерование.

Инструменты для обработки форм и штампов, с. 65, ил. 1.

Фирма Stellram (США) выпустила каталог "Focused Products ", в котором приведены характеристики выпускаемых режущих инструментов, конструкции которых отражают последние разработки в области изготовления форм и штампов. В число выпускаемых инструментов входят фрезы для резания при высокой скорости подачи, врезные фрезы, неповоротные цилиндрические инструменты, черновые и чистовые инструменты и различные сборные инструменты.

Каталог по твердосплавным инструментам, с. 68, ил. 1.

Отделение C. C. S. фирмы Commercial Grinding Service Inc. (США) выпустило каталог, в котором приведены характеристики выпускаемых твердосплавных сверл, концевых фрез, разверток, пил и конических зенковок. Наряду с детальными характеристиками инструментов приведены рекомендуемые режимы резания.

Режущие инструменты для микрообработки, с. 71, ил. 1.

Фирма Cutting Edge Technologies (США) специализируется на выпуске быстрорежущих (в том числе кобальтовых) и миниатюрных мелкозернистых инструментов, данные о которых включены в выпущенный каталог. Дана информация по инструментам, начиная с минимального диаметра 0,1 мм, фрезам для обработки графита и длинным концевым фрезам для обработки труднодоступных геометрических поверхностей деталей.

Цанговые патроны для инструментов, с. 72, ил. 1.

Фирма Command Tooling Systems (США) выпустила серию DR(ER)32 коротких цанговых патронов для крепления инструментов диаметром от 2 до 20 мм. Малый вылет обеспечивает патронам высокую жесткость и позволяет увеличивать размеры обрабатываемых деталей. Указывается, что режимы резания при использовании новых патронов могут быть повышены в 3 раза по сравнению с использованием традиционных.

Cutting Technology (N 4, Vol. 6, 2005, США)

Исследования в области технологии обработки микродеталей, с. 17.

В университете штата Огайо (Толедо, США) создан Центр прецизионной микрообработки (Precision Micro-Maching Center), где осуществляются теоретические и прикладные исследования для предприятий автомобилестроения, станкоинструментальной отрасли и производителей смазочно-охлаждающих жидкостей. В работах принимают участие компании США, Японии, Австрии, Индии и Италии. Работы центра сосредоточены на технологии микрообработки труднообрабатываемых материалов, когда заданы высокая точность и получение чистых поверхностей субмикронного уровня и выше.

Проектирование гибких производственных ячеек, с. 29.

Фирма Utica Enterprices Inc. (США) проектирует и изготовляет гибкие производственные ячейки для производства автомобильных дверей. Ячейку моделировали с помощью программного пакета компании Delmia Corp с учетом перестройки на двери будущего, причем ставилась задача минимальной перестройки. Предусмотрено программирование в офлайновом режиме; программы охватывают до 20 позиций рабочих органов роботов.

Зажимное устройство для инструментов для обработки отверстий, с. 26.

[1] Раздел подготовлен инж. Г. С. Потаповой (по вопросам получения материалов из зарубежных журналов обращаться по тел./факсу: (495) 611 21 37, e-mail: stankoinform@mail.ru).

Используемое на предприятии фирмы Turnamatic Machine Inc. зажимное устройство PowRgrip (разработано компанией Rego-Fix Tool Corp.) обеспечивает радиальное биение 2,5 мкм на длине, составляющей четыре диаметра инструмента. Такая точность необходима, например, при сверлении отверстий, в которые запрессовываются штифты. Получаются отверстия без конусности при допусках + 0,0125 мм/–0. Обрабатываются заготовки из цельного алюминия, в том числе отливки. Жесткость зажимных устройств позволяет выдерживать большие нагрузки.

Industrial Diamond Review (N 1, 2006, Великобритания)

Weber G. Контроль процесса изготовления алмазного инструмента, с. 39, 40, ил. 3.

Отмечается, что возрастание глобализации требует быстрого доступа к параметрам процесса и надежного контроля качества изготовления алмазного инструмента. Фирма Fritsch Sondermaschinen достигла выполнения этих требований созданием новой технологической связи между станком и ПК. Такая связь, например, с прессом для спекания или машиной для лазерной сварки может быть реализована путем присоединения станка к сети фирмы или ПК. Приведено описание оборудования для сбора данных о реализуемых процессах изготовления инструментов, возможностях автоматического пересоединения станка с такими компьютерными системами и различных приборах для анализа производственных процессов.

Maschinenmarkt (N 8, 2006, Германия)

Kuttkat B. Новинки в области электроэрозионной обработки, с. S14—S16, ил. 6.

Основные направления совершенствования электроэрозионных станков и технологии обработки — увеличение скорости съема металла и обеспечение высокого качества обработанной поверхности. Фирма Agie (Германия) реализует их за счет применения новых генераторов и оптимизации условий промывки. В результате производительность станков при обдирке возросла на 25 %, параметр шероховатости *Ra* = 0,05 мкм. Для работ в нанообласти фирма Sodick (Германия) разработала станок Agietron Micro Nano с точностью позиционирования 0,1 мкм и отклонением формы менее 1 мкм. Фирма Zirnmer + Krleim (Германия) предлагает производственный модуль, состоящий из эрозионного станка Genius 700, манипуляционной системы Chameleon, скоростного фрезерного станка и измерительного устройства.

Прошивание отверстий на высокоточном электроэрозионном станке, с. 133.

Фирма Makino Europe (Германия) выпускает станок EDNC 301 с встроенным магазином инструментов, который позволяет прошивать отверстия диаметром 0,1 мм. Технологические перемещения по осям *X*, *Y* и *Z* составляют 300, 250 и 250 мм. Пиноль вращается с частотой до 1000 мин$^{-1}$. Трубчатый держатель обеспечивает охлаждение электродов.

Диэлектрик для электроэрозионной обработки, с. 139.

Фирма Oelheld (Германия) предлагает диэлектрик Ionoplus, применение которого в электроэрозионных станках увеличивает съем металла на 20 %, снижает износ медных электродов до 40 % и уменьшает параметр шероховатости поверхности с 12 до 4—6 мкм.

Обезжиривающие растворы длительного действия, с. 141, ил. 1.

Фирма Surtec Deutschland (Германия) предлагает три новых раствора. Первый раствор Surtec 170 не содержит силикатов и предназначен для очистки чугунных и стальных деталей. Второй раствор Surtec 171 содержит силикаты и может дополнительно использоваться для очистки деталей из цветных металлов. Оба раствора содержат бóльшее количество щелочи и комплексообразователя, характеризуются высокой проводимостью и длительным сроком службы в ванне. Третий раствор Surtec 601 может использоваться для фосфатирования.

Quality Digest (N 3, Vol. 25, 2005, США)

Контрольно-измерительные микроэлектромеханические устройства, с. 26.

Технология изготовления микроэлектромеханических устройств используется при производстве приводных блоков и сенсоров, которые приводятся в действие химическими, струйными, магнитными, термическими и биологическими средствами, а также для распознавания перемещений. Типичными применениями в автомобилестроении являются микроэлектромеханические или микрооптико-электромеханические устройства для контроля поведения автомобиля и его движений, предотвращения заносов и задействования предохранительных воздушных подушек.

Mullenhour P. et al. Организация экономичного производства, с. 38, 41.

Рассмотрены вопросы одновременных мероприятий по организации экономичного производства и получения изделий по критерию точности "6 сигма". Отмечается совместимость достижения обеих целей. В число мероприятий входят стандартизация работ, минимизация отходов, упорядочение складского хозяйства, анализ механизмов и последствий отказов, создание инвентарных запасов только для текущего производства и другие. Приведены примеры.

(N 6, Vol. 25, 2005, США)

Технологическая интеграция расширяет разрыв в уровнях производительности между США и европейскими странами, с. 8. ил. 1.

Рассмотрены результаты анализа исследовательской организации The Conference Board причин отставания европейских стран от США по темпам роста производительности труда. Отмечается, что производительность труда среди розничных поставщиков в США выросла с 2,6 % в период 1980—1995 гг. до 7,4 % в 1995—2002 гг. В качестве причин указаны новые информационные и коммуникационные технологии, использование штриховых кодов, масштабность связей, стимулирование инвестиций, отсутствие языковых и культурных отличий в США. Обращается внимание на положительную роль интеграции стран Европы, которая позволит постепенно преодолеть образовавшийся разрыв.

Сканирующая измерительная головка, с. 21.

Пустотелый наконечник сканирующей головки REVO спроектирован таким образом, что он может изгибаться, поэтому изгибается и траектория лазерного луча, который принимается датчиком положения, смонтированным в корпусе головки. Перемещение лазерного пятна в датчике преобразуется в измерительный сигнал путем сочетания перемещения с данными о геометрии головки и наконечника и данными с измерительных шкал на каждой из осей координатной машины. Таким образом, точно

рассчитывается положение вершины наконечника. Этот процесс реализуется в результате динамического сканирования детали наконечником, а головка перемещается синхронно с координатно-измерительной машиной. При минимальном инерционном воздействии на лазерный луч высокая точность измерения поддерживается и при длинном наконечнике (400 мм).

Прибор для измерения шероховатости поверхности, с. 57, ил. 3.

Описан прибор Surfcom 130A фирмы Carl Zeiss IMT Corp. для измерения шероховатости и волнистости поверхности. Отмечается высокий показатель соотношения стоимости/качества. Указывается простота переналадки прибора на новые задачи, например такие, как ощупывание небольших отверстий или глубоких пазов. При повороте под прямым углом он позволяет определять шероховатость цилиндрических деталей с точностью до 0,3 мкм на длине 50 мм. Большой экран с подсветкой виден при любых световых условиях. Прибор поставляется в комплекте со скоростным термографическим принтером.

Справочник по производителям оптических измерительных приборов, с. 60—62.

Приводится список 80 производителей оптических измерительных приборов США. В эту группу включены производители и поставщики инструментов, в которых используется сила света для выполнения размерных измерений. В отдельных случаях они предлагают сервисное обслуживание своей продукции. Отмечается возможность получения детальной информации о предлагаемой продукции на сайтах, указанных после адреса и телефона каждого из них.

Werkslatt und Betrieb (N 7/8, Vol. 138, 2005, Германия)

Kobler P. et al. Фрезерование сложных профилей, с. 16, 18, 19, ил. 5.

Описывается способ фрезерования фасонных лопаток турбины двигателя самолета. Эффективное фрезерование в этом случае обеспечивается за счет сочетания одновременной обработки по пяти осям на обрабатывающем центре и систем CAD/CAM с соответствующим программным обеспечением. Предварительно процесс обработки моделируется и на экране дисплея выбирается стратегия фрезерования и режимы резания, которые и закладываются в рабочую программу.

Damm H. Обработка крупных деталей, с. 30, 32, 34, ил. 4.

Описывается опыт машиностроительной фирмы Maschinenbau Hendrik Hilbring по применению крупных фрезерных станков и обрабатывающих центров фирмы Matec Maschinenbau при комплексной обработке по пяти осям различных деталей длиной в несколько метров. Речь идет о горизонтально-фрезерном станке с длиной рабочего перемещения по оси *X* до 4 м, а также об обрабатывающем центре Matec-30 HV с поворотной шпиндельной головкой, обеспечивающей одинаковые производительность и точность обработки в горизонтальном и вертикальном положениях.

(N 10, Vol. 138, 2005, Германия)

Springfeld P. Точное манипулирование тяжелыми чугунными деталями, с. 30—34, ил. 9.

Описываются технологические процессы на заводе в Маннгейме фирмы John Deere, где производится механическая обработка чугунных корпусов дифференциалов к тракторам, масса которых достигает 240 кг. Для этого используется 10 многооперационных станков фирмы Hëller, которые соединяются в единую технологическую цепочку электрогидравлическими манипуляторами фирмы MT грузоподъемностью 350 кг. Они перемещают корпус между станками, позиционируют его с точностью до 0,1° и ± 1,5 мм, выполняют обмеры обработанных корпусов, наклоняют их для слива СОЖ, а также выполняют другие необходимые операции.

Обработка коленчатых валов, с. 41.

Для сверления смазочных отверстий и обработки концов коленчатых валов для легковых и грузовых автомобилей применяется станок HSC1500, разработанный германской фирмой Emag Maschinenfabrik. Диаметры обрабатываемых валов 190—330 мм, длина — от 300 до 1500 мм, максимальная масса — 200 кг. Отверстия диаметром 4—8 мм сверлят многошпиндельной головкой при минимальном расходе СОЖ; отношение длины сверла к диаметру — до 20. Обработанные валы перед снятием с линии подвергаются необходимым обмерам, их результаты представляются в виде протокола.

Steck H. Специальные режущие инструменты, с. 57—60, ил. 7.

Фирма Ingersoll Werkzeuge GmbH специализируется на разработке и изготовлении малых серий специального режущего инструмента, предназначенного для использования в автоматических магазинах. В качестве примера следует назвать комплект из 72 инструментов для обработки коленчатых валов. Большая часть представленных инструментов может выполнять несколько операций, например, сверление и фрезерование.

Круглопильный автомат для цветных металлов, с. 73, ил. 1.

Швейцарская фирма Rohbi AG выпустила автомат KTC 100-NF высокой производительности и точности. Он комплектуется дисковой пилой диаметром 355 мм и шириной 2 мм с твердосплавными зубьями и оснащен ЧПУ. В магазин загружаются полуфабрикаты в виде круглых стержней диаметром 10—100 мм или многоугольных стержней с длиной стороны 10—80 мм. Масса станка составляет 2700 кг, мощность привода 11 кВт, частота вращения 1600—4000 мин$^{-1}$. Алюминиевый стержень с диаметром 30 мм разрезается за 0,5 с, диаметром 100 мм — за 2,8 с.

Trametal (N 184, 2005 (приложение к № 93, Франция)

Тенденция совершенствования высоких технологий, с. 8.

Ряд тайваньских фирм интенсивно работают в области разработки оборудования, отвечающего требованиям высокой технологии, стремясь достичь лидирующего положения в области создания станков. В этой связи Министерство экономики Тайваня выделило значительные средства на исследования и разработки новых станков с линейными двигателями. В Салоне, состоявшемся в Сеуле, свои разработки в этой области представили девять тайваньских фирм. Приведены сведения о дальнейших планах по разработкам и исследованиям, указаны средства, выделяемые на эти мероприятия.

Е. С. ДОБРИНСКИЙ, канд. техн. наук
(Центр экспертных программ ВОК),
В. А. СЕИН, инж.
(Аналитический центр ОАО "АСМ-холдинг")

Технологическое обеспечение национального автомобилестроения[1]

Какова государственная политика в области автомобилестроения на ближайший и среднесрочный периоды?

Какова "архитектура" технологии автомобилестроения?

Каковы пути комплексного обеспечения качества в сферах производства и технологии?

Каковы конкретные приоритетные направления современной технологии и прогрессивных материалов в области автомобилестроения?

Насколько эффективны процессы интеграции производителей и потребителей технологического оборудования, материалов и инструментов в отечественном автомобилестроении?

На эти и другие вопросы, определяющие современное состояние и перспективы развития технологии отечественного автомобилестроения после четырех лет реализации "Концепции развития автомобильной промышленности России на период до 2010 г." и действующего ФЗ № 184-03 от 27 декабря 2002 г. "О техническом регулировании", должны были получить ответы участники 4-го Конгресса технологов автомобилестроения, который состоялся 30 августа 2006 г. в МВЦ "Крокус Экспо".

Конгресс прошел в рамках деловой программы Московского международного автомобильного салона "Автосалон—2006". Организатором конгресса традиционно стало ОАО "АСМ-холдинг" при поддержке Минпромэнерго РФ, ТПП РФ, НП "Объединение автопроизводителей России", НО "НАПАК" и научном сопровождении ряда НИИ отрасли.

В работе конгресса приняло участие рекордное за всю историю этого мероприятия число участников — свыше 100 ведущих отечественных и зарубежных специалистов автопрома и смежных отраслей. На конгрессе были заслушаны 18 докладов и сообщений о современном состоянии и тенденциях развития технологий и материалов для автомобильной промышленности.

Для предприятий автомобилестроения и машиностроения обсуждаемые проблемы явились чрезвычайно актуальными в свете мониторинга и контроля за утвержденным Минпромэнерго РФ приказом от 22 июля 2005 г. № 214 "Планом мероприятий по реализации в среднесрочный перспективе (2005—2008 гг.) приоритетных задач, предусмотренных Концепцией развития автомобильной промышленности России".

Все выступления, прозвучавшие на конгрессе, были сгруппированы в рамках пленарной сессии и трех секций в зависимости от направлений технологии автомобилестроения.

На пленарной сессии были представлены доклады ряда федеральных органов исполнительной власти Минпромэнерго России, а также отраслевых общественных организаций — НП "Объединение автопроизводителей России" и НО "НАПАК". Конгресс открылся докладом зам. директора Департамента промышленности Минпромэнерго России Н. Т. Сорокина "Программа реализации Концепции развития автомобильной промышленности России на период 2005—2008 гг.". Докладчик отметил, что в соответствии с концепцией в среднесрочный период необходимо решить задачу выхода российского автопрома на новый качественный уровень. В частности, среди приоритетных задач 2006—2008 гг. докладчик отметил следующее:

— повышение доли высокотехнологичных и наукоемких производств по выпуску автомобильных компонентов нового поколения;

— разработка мер по тарифному и нетарифному регулированию автомобильного рынка России с учетом условий возможного вступления в ВТО;

— кардинальное обновление научно-исследовательской базы и проведение НИОКР по созданию новых перспективных конструкций автомобилей и компонентов.

Ведущими отечественными бизнес-структурами — ОАО "АвтоВАЗ", ОАО "КамАЗ", ОАО "ЗИЛ", ОАО "АЗ Урал" и др. — разработаны перспективные планы развития производства. Обеспечен в 2005 г. рост производства автобусов среднего, большого и особо большого классов; по сравнению с 2004 г. в 2 раза больше выпущено троллейбусов.

Вместе с тем, в докладе отмечаются и трудности, с которыми сталкивается отрасль. В 2005 г. изготовлено 1068 тыс. шт. легковых автомобилей, что на 3,9 % ниже выпуска 2004 г. Производство легковых автомобилей "ГАЗ" снизилось на 21,5 %, "УАЗ" — на 6,4 %, "СеАЗ" — 31,8 %, "ЗМА" — 26,6 %, что связано, по мнению докладчика, со снятием с производства устаревших моделей.

Среди мер государственной поддержки отечественного автомобилестроения докладчик отметил:

— утверждение Правительством РФ 29 мая 2006 г. № 781-р новой программы разработки технических регламентов, позволяющих учесть требования безопасности по всему жизненному циклу изделий автомобильной техники;

— уточнение процедуры сертификации транспортных средств по схеме малых партий (внесение изменений в "Правила по проведению работ в системе сертификации механических транспортных средств и прицепов");

— подготовка изменений и дополнений в совместный приказ Минэкономразвития России, Минпромэнерго России, Минфина России от 15 апреля 2005 г. № 73/81 /58н "О порядке, определяющем понятие "промышленная сборка" и др.

Предлагаемые мероприятия по развитию автомобилестроения нацелены на сохранение за отечественными производителями и производителями иномарок на территории России более 50 % рынка автомобильной техники с увеличением экспорта продукции до 30 % общего объема выпуска. Это позволит обеспечить с учетом занятых в смежных отраслях промышленности дополнительное число рабочих мест.

Государственной политике в области стандартизации продукции автостроения был посвящен также доклад исполнительного директора НП "ОАР" И. А. Коровкина "Особенности применения Федерального закона № 184-ФЗ "О техниче-

[1] По итогам 4-го Конгресса технологов автомобилестроения (информационно-аналитический обзор).

ском регулировании" в автомобильной промышленности, вступившего в силу с 1 июля 2003 г. Докладчик считает, что указанный закон при его реализации забуксовал в результате несоответствия в правовом поле отдельных положений, разрыва между техническими регламентами и стандартами. Предлагается в возможно короткий срок внести в закон ряд принципиальных изменений:

— в ст. 7 — в части необходимости ссылки на национальные стандарты;

— в ст. 10 — в части принятия специальных технических регламентов постановлением Правительства РФ без ограничения срока их действия;

— в ст. 46 — в части возможности внесения органами федеральной исполнительной власти изменений и дополнений в действующие национальные стандарты и другие НТД до введения в действие соответствующих технических регламентов;

— исключить из сферы действия закона процессы производства, так как требования к процессам производства должны определяться законодательством об охране труда и охране окружающей среды.

В докладе ген. директора ООО "Автомобильный завод "Алтай" В. М. Вертипрахова "Развитие автосборочного производства внедорожников импортного производства как мощный фактор развития автомобильной промышленности России" освещены факторы, сдерживающие полноценное развитие и становление автосборочных производств в России.

Продуктовый ряд завода "Алтай" включает сборку четырех модификаций джипа-универсала и джипа-пикапа "Адмирал", джипа-универсала "Шатл", а также самосвала "Алтай 3310". Все они собираются из комплектующих известных автопроизводителей (KIA, MITSUBISHI, FAW).

Среди государственных мер, по мнению докладчика, целесообразных для принятия Правительством, следует в первую очередь рекомендовать:

— создание выгодных условий для инвестирования средств в данный вид автомобилестроения как для отечественных инвесторов, в том числе банков (в настоящее время предлагаются лишь коммерческие кредиты со ставкой не менее 14 % в год), так и для зарубежных инвесторов;

— содействие федеральных органов управления созданию автосборочных производств внедорожников путем предоставления таможенных льгот для ввоза импортных комплектующих и снижение существующих ставок налогообложения;

— создание в составе Минпромэнерго РФ при Департаменте промышленности исполнительного органа — Комитета по развитию автомобилестроения.

Секционная часть конгресса открылась сессией "Системы обеспечения качества производства и технологии". Важная тема технологического качества в условиях массового производства поднята в докладе начальника технологического отдела ОАО "АвтоВАЗ" А. В. Здобнова "Информационная система "Внедрение проверки (аудит) технологических процессов (ВПТП)". В объединении разработана и функционирует эффективная информационная система проведения проверок технологических процессов, позволяющая оперативно получать информацию о работе зарегистрированных в ней пользователей. Система формирует восемь выходных форм аудита. Среди них поквартальные графики проверок I и II уровней (основные и ТСО); ежемесячные и годовые отчеты и планы по проведенным проверкам; сводки по мероприятиям с сорванными сроками исполнения и корректирующими мероприятиями и др.

К настоящему времени зарегистрированы порядка 400 пользователей из 19 технологических и производственных подразделений.

Проблемам выработки регламентов к индустриальным ремонтным технологиям посвящено сообщение представителя Регионального союза автотранспортников К. Л. Гаврилова "Проект технического регламента "О требованиях безопасности при техническом обслуживании и ремонте автотранспортных средств". Докладчик считает обязательным включение в подготавливаемый технический регламент специального раздела, посвященного ремонту ДВС. В содержательную часть указанного раздела предлагается включить технологическую последовательность операций техпроцесса по ремонту ДВС и требования к наличию и соответствию технологического оборудования современным требованиям экологии и долговечности работы АТС.

Станки, оборудование и инструменты. Представитель Российской ассоциации "Станкоинструмент" — директор по связям с промышленностью и госструктурами Н. П. Юденков в презентационном докладе "Оборудование, инструмент и услуги для совершенствования технологических процессов в автомобилестроении, предлагаемые ассоциацией "Станкоинструмент" представил инновационные разработки ведущих отечественных станкостроительных и инструментальных заводов применительно к специфике автостроения. Предложен широкий спектр новейшего автоматизированного высокопроизводительного оборудования и инструмента, полностью соответствующих современным тенденциям развития процессов обработки металлов. Ассоциация рекомендует сотрудничать предприятиям автопрома с сетью созданных региональных центров технологического развития (РТЦ), которые формируются, как правило, на одном из машиностроительных предприятий региона для технического переоснащения на базе современных технологий существующего парка металлообрабатывающего оборудования высокопроизводительным наукоемким оборудованием. Предусматривается также проведение модернизации и ремонт существующего парка МОО на базе современных комплектующих и ЧПУ. Для решения финансовых проблем заказчиком при изготовлении оборудования и его реализации ассоциацией предлагаются различные варианты, включая лизинг (через компанию "Машлизинг"), льготные кредиты (с "Российским банком развития"). Ассоциация заключила соглашения с 18 регионами России о сотрудничестве, позволяющие с помощью администраций получать различные льготы и преференции. В заключение докладчик отметил, что ассоциация крайне заинтересована в том, чтобы заводы автомобильной промышленности оснащались отечественным технологическим оборудованием.

Разработкам в области эффективного режущего инструмента и технологической оснастки был посвящен доклад зам. начальника отдела инструментального производства ОАО "АвтоВАЗ" А. Н. Ярцева "Применение уникальных технологий вакуумного ионно-плазменного напыления (TiN, TiAlN, TiCN) на рабочие поверхности металлорежущего инструмента и оснастки". Докладчик рассказал об открытии в 2005 г. Центра упрочняющих технологий, оснащенного современным оборудованием мирового уровня. Оборудование Центра позволило внедрить технологии многослойных покрытий из нитридов, карбидов, карбонитридов тугоплавких элементов с возможностью проведения предварительного диффузионного насыщения (ионно-плазменного азотирования), а также освоить технологии, позволяющие конденсировать покрытия в бескапельном режиме.

Применение этих технологий, по исследованиям заводских специалистов, позволило повысить стойкость червячных фрез, холодно-штампового инструмента до 2 раз по сравнению с серийным оборудованием. В ближайших планах расширение номенклатуры обрабатываемого инструмента (осевого, протяжного, литейной оснастки и др.).

Комплексные решения обработки ведущих деталей двигателей и автомобилей (коленчатых и распределительных валов, блоков цилиндров, валов и шестерен, тормозных дисков, деталей ШРУСов) с применением широкой номенклатуры высокопроизводительного комплектного режущего твердосплавного инструмента и оснастки предлагаются в презентационном докладе начальника отдела маркетинга ООО "Сандвик" М. П. Беляева "Современные технологии металлообработки и металлорежущий инструмент для автомобильной промышленности". По мнению специалистов ООО "Сандвик", только за счет повышения режимов резания при применении твердосплавного инструмента с технологией Sandvik Coromant достигается снижение себестоимости изготовления одной детали не менее чем на 15 %.

Докладчик представил новый универсальный сплав GC4225 для токарной обработки стальных деталей, сплав CoroMill 365 для обработки чугуна, а также современные кассетные конструкции семейства торцовых фрез для черновой и получистовой обработки стали, алюминия и чугуна.

Современные технологии и прогрессивные материалы. Сессия открылась выступлением одного из руководителей Центра сборочных комплектов (ЦСК) ОАО "АвтоВАЗ" А. Ю. Чумаева "Современные технологии производства и поставок сборочных комплектов автомобилей "LADA". Специалисты ОАО "АвтоВАЗ" на основе изучения мирового опыта организации сборочных производств как вида товарной продукции разработали и реализовали внешнюю сборку автомобилей "LADA" на базе современных технологий в зависимости от степени разобранности автомобиля. При этом специалистами ОАО "АвтоВАЗ" решены организационно-технические и экономические вопросы, среди которых тестирование производства и организация поставок сборочных комплектов; сдача, обработка и складирование комплектов; трансфер тары, используемой в технологической цепочке, изготовление и перевозки комплектующих сборочных комплектов; доставка комплектующих сборочных комплектов на автосборочные предприятия и др.

В настоящее время ОАО "АвтоВАЗ" осуществляет поставки сборочных комплектов "LADA" на базе кузова на 10 автосборочных предприятий России, стран СНГ и дальнего зарубежья. В таблице приведена география поставок сборочных комплектов автомобилей "LADA" на 2006 г.

Модельный ряд собираемых вне основной площадки автомобилей включает в себя "классику" (ВАЗ-21043, ВАЗ-2107), ВАЗ-21093/99, семейство ВАЗ-2110, автомобили 4 × 4, а также целый ряд специальных автомобилей на базе автомобилей "LADA" (пикап, минигрузовик, скорая помощь, LADA-Премьер и др.).

Всего в 2006 г. необходимо было поставить на автосборочные предприятия около 137 тыс. автомобилей "LADA" в разобранном виде, а также 11,5 тыс. силовых агрегатов "LADA" для сборки автомобилей "Ока". Маркетинговые предложения автосборочных предприятий в перспективном плане поставок сборочных комплектов "LADA" охватывают новые рынки. Среди них Бразилия, Иордания, Индия, Йемен, Куба, Китай. Поставки сборочных комплектов остаются одной из основных частей стратегического развития ОАО "АвтоВАЗ" для максимального удовлетворения спроса и расширения доли своей продукции на различных рынках. По оценкам специалистов, в автомобилестроении этот вид товарной продукции составляет не менее 55 % общего стоимостного объема мирового машиностроительного рынка международной торговли.

Автосборочное предприятие	Страна/город
"Супер Авто"	Россия/Тольятти
ЗАО "ВАЗ интерСервис" (ВИС)	Россия/Тольятти
"Моторика"	Россия/Тольятти
СП "GM-AVTOVAZ"	Россия/Тольятти
ОАО "ИжМашАвто"	Россия/Ижевск
ОАО "ЛуАЗ"	Украина/Луцк
ООО "Кременчугский автосборочный завод"	Украина/Кременчуг
ЗАО "Запорожский автомобильный завод"	Украина/Запорожье
ЗАО "АЗИА АВТО"	Казахстан
Автосборочное предприятие	Египет/Каир

С докладом "Оптимизация технологических процессов сборки автомобилей с использованием информационных технологий" выступил специалист ОАО "АвтоВАЗ" А. Ю. Волковинский.

Разработанные методология и информационная система, включающие различные прикладные программы, позволяют в режиме реального времени проектировать оптимальные техпроцессы (операционные карты и карты циклов обработки) сборки с расчетом нормативов и норм времени применительно к конкретной сборочной линии, участку, производству.

Общая схема информационной системы включает четыре основные блока: разработки техпроцесса, нормирования, расчетов нормативов времени и организационно-технологического обеспечения сборочных операций. Применение информационной системы позволило сделать работу по формированию технологических процессов и их оптимизации более качественной с достижением желаемого результата и наименьшими издержками по времени.

Проблемам обеспечения технологического качества автомобильных деталей, внедрения ряда инновационных технологий и материалов были посвящены выступления представителей ряда научных организаций: Г. М. Алексеева (ОАО "НИИТавтопром") — "Преимущества и перспективы применения лазерно-световой обработки"; Д. А. Локтева (ЗАО "ИТЦ Технополис") — "Современные технологические и организационные решения в автомобилестроении; В. И. Карцева (ЗАО "Диарим-Б", ОАО "НИИТавтопром") — "Карбиды титана и кремния, их модификации и области применения в конструкциях машин" и др.

Мнения зарубежных разработчиков и производителей оборудования, технологий, инструмента и материалов в своих презентационных выступлениях изложили представители ряда зарубежных и совместных фирм: Mezservis spol. S. r. o. (Чехия) — "Испытательные стенды с динамометрами постоянного тока и асинхронными динамометрами. Барабанные испытательные стенды"; HENKEL TECHNOLOGIES (Германия) — "Продукты, технологии и материалы для автомобилестроения"; ЗАО "ADВинжиниринг" — дистрибьютор компании ATLAS COPCO (Швеция) — "Интеллектуальные гайковерты в сборочном производстве"; компания "САННЕН" (США) — "Современное оборудование для ремонта ДВС".

Главным итогом конгресса технологов явились выработанные рекомендации, которые предстоит учесть автомобилестроителям в ходе последовательной реализации "Концепции развития автомобильной промышленности России". Участниками конгресса поддержано предложение ОАО "АСМ-холдинг" и НП "Объединение автопроизводителей России" (ОАР) при участии заинтересованных организаций, предприятий и ведомств провести юбилейный 5-й Конгресс технологов автомобилестроения и 4-ю Международную специализированную выставку "Автомобильные технологии и материалы — "АТиМ—2007" с 14 по 17 февраля 2007 г. в рамках Международного автомеханического салона—2007" в Международном выставочном центре "Крокус Экспо".

По итогам конгресса издан полный сборник докладов и тезисов, который можно заказать в Аналитическом центре ОАО "АСМ-холдинг" (www.asm-holding.ru).

3-я Международная выставка "Российская неделя контрольно-измерительного оборудования"

ЭКСПОЦЕНТР

В Москве на ЦВК "Экспоцентр" с 10 по 12 октября 2006 г. проходила 3-я Международная выставка "Российская неделя контрольно-измерительного оборудования", организованная компанией Novex Limited (Кипр) при содействии ЗАО "Экспоцентр". В экспозиции были представлены контрольно-измерительные приборы и автоматика; аналитические, оптические и оптико-механические приборы; тестирующее и испытательное оборудование; технологии и методика аналитического контроля; различные реактивы и материалы. В выставке приняли участие более 60 компаний из многих стран, в том числе из России. Экспозиционная площадь выставки составила 300 м^2.

Ниже приведено краткое описание некоторых экспонатов и предложений разработчиков, демонстрировавшихся на выставке.

ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений" (Московская обл., Солнечногорский район, п/о Менделеево):

— *твердомер портативный динамический МЕТ-Д2* для измерения твердости металлов и сплавов по шкалам Роквелла, Бринелля, Виккерса и Шора, состоящий из электронного блока и динамического датчика. Индентор, вмонтированный в датчик, представляет собой ударный элемент с твердосплавным сферическим наконечником. Динамический принцип работы твердомера основан на измерении отношения скоростей индентора при падении и отскоке от поверхности контролируемого изделия. Отношение скоростей индентора при отскоке и падении характеризует твердость материала. Длительность одного цикла измерения твердости не более 3 с, число запоминаемых результатов измерений 100. Питающее напряжение твердомера 220 В от сети переменного тока и 1,5 В от аккумулятора, потребляемая мощность 3 Вт. Габаритные размеры электронного блока твердомера 145 × 80 × 40 мм, датчика — длина 80 мм, диаметр 25 мм. Масса электронного блока с датчиком 0,4 кг.

Основные технические характеристики твердомера приведены в таблице.

Твердомер может быть использован в производственных и лабораторных условиях в машиностроении, металлургии и других отраслях промышленности;

— *портативный универсальный миллитесламетр ТПУ-06* для измерения магнитной индукции постоянных и переменных (средневыпрямленного и амплитудного значений) магнитных полей, а также однократных импульсов магнитного поля. При подключении к аналоговому выходу миллитесламетра осциллографа имеется возможность наблюдения формы переменного и импульсного магнитных полей. Прибор удобен при исследовании магнитных систем различного назначения, в магнитопорошковой дефектоскопии, для измерений остаточной намагниченности, в том числе в цеховых условиях. Питание прибора от батарейки напряжением 9—12 В.

ОАО "Краснодарский ЗИП" (Краснодар) — широкая гамма измерительных приборов:

— *переносной показывающий ампервольтметр АВО 3001* для измерения напряжения, постоянного и переменного токов, электрического сопротивления постоянному току с частотой 65—1000 Гц. По принципу действия прибор относится к магнитоэлектрическим с подвижной рамкой на кернах, набором шунтов и делителей для расширения пределов измерения по току и напряжению. Измерение сопротивления осуществляется операционным усилителем с набором опорных резисторов и источника опорного напряжения, выполненного на прецизионном стабилитроне. Прибор выдерживает перегрузку 120 % в течение 2 ч, обеспечивает работу в круглосуточном режиме, устойчив к воздействию атмосферных осадков и пыли. Диапазон измерений: напряжение постоянного тока 0,18—600 В, класс точности 1,5; напряжение переменного тока 0,3—600 В, класс точности 2,5; постоянный ток 0,3 мА—6 А, класс точности 1,5; переменный ток 3 мА—6 А, класс точности 2,5. Питающее напряжение прибора 4,8—6,2 В, имеется защита от неправильного включения элементов питания. Ампервольтметр работает при температуре окружающей среды –10—40 °С с относительной влажностью до 80 %. Габаритные размеры 200 × × 130 × 80 мм, масса 1,5 кг;

— *поверочная установка У300* для поверки амперметров и вольтметров постоянного и переменного тока всех систем методом сличения с показаниями образцовых приборов классов точности 0,2. Установка оснащена устройством защиты выпрямителей высоковольтного блока от перегрузки и делителем напряжения для поверки милливольтметров и микроамперметров. Коэффициент нелинейных искажений выходного переменного напряжения 2 %, потребляемая мощность 750 Вт, температура окружающей среды 10—35 °С, влажность до 80 %. Установка работает от сети переменного тока напряжением 220 В с частотой 50 или 500 Гц. Габаритные размеры 440 × 1040 × 720 мм, масса — 180 кг;

— *многофункциональный калибратор МП 3001* с микропроцессорным управлением (рис. 1) для поверки и разбраковки в автоматическом режиме на постоянном токе аналоговых и цифровых амперметров, вольтметров, ваттметров, измерения постоянного напряжения и сопротивления постоянному току. Выполняет также следующие функции: запоминание результатов поверки; установку и коррекцию нуля в автоматическом режиме; контроль выходной величины; изменение полярности выходной величины; аварийную сигнализацию. Для печати протокола поверки имеется интерфейс PS-232 для выхода на внешнее печатающее устройство. Потребляемая мощность калибратора 400 Вт, питающее напряжение 220 В, рабочий диапазон температур 10—35 °С, допустимая основная погрешность 0,0005—0,2 %. Габаритные размеры 490 × 420 × 629 мм, масса 50 кг;

— *мост постоянного тока Р333* для измерения сопротивлений по оди-

Диапазоны измерений твердости по шкалам		Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения твердости
"С" Роквелла	(25—70) HRC	±3 HRC
Бринелля	(150—450) HB	±15 HB
Виккерса	(400—875) HV	±25 HV
Шора "D"	(30—100) HSD	±4 HSD

Рис. 1. Многофункциональный калибратор МП3001 с микропроцессорным управлением

нарной схеме, определения места повреждения кабеля, измерения асимметрии проводов. Класс точности 0,5, температура окружающей среды 10—35 °С при влажности до 80 %. Габаритные размеры 300 × 230 × 150 мм, масса 5 кг.

ЗАО "ОПТЭК" (Санкт-Петербург) — газоанализаторы для контроля воздуха рабочей зоны, газовых промышленных выбросов и др.:

— *комбинированный полуавтоматический пылемер-нефелометр "ОМПН-10.0"* для измерения концентрации аэрозольных частиц различного происхождения и химического состава при контроле превышения предельно допустимых концентраций в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны. Принцип действия пылемера основан на комплексном использовании оптического и гравиметрических методов и заключается в регистрации рассеянного излучения оптическим датчиком и параллельном принудительном прокачивании анализируемой пробы воздуха через аналитический фильтр. Диапазон измерения концентрации аэрозоля 0,01— 100 кг/м^3, предел допустимой относительной погрешности измерений ±20 %. Выходной аналоговый сигнал оптического блока 5 В, потребляемая мощность 65 Вт, питающее напряжение 220 В. Габаритные размеры оптического блока 221 × 150 × 87 мм, электроаспиратора 238 × 293 × 225 мм. Масса оптического блока 1,5 кг, электроаспиратора — 7,2 кг. Условия эксплуатации прибора: температура –10—40 °С, влажность до 95 %;

— *газоанализатор "Каскад-200"* (рис. 2) для оптимизации процессов горения в котлах, работающих на газе, жидком и твердом топливе, а также анализа промышленных выбросов. Принцип действия газоанализатора — электрохимический. Он представляет собой автоматический многокомпонентный переносной показывающий прибор непрерывного действия, снабженный встроенными побудителем расхода и аккумулятором, имеет в своем составе и пробоотборный зонд;

— *многокомпонентный стационарный газоанализатор "ОПТОГАЗ-500.3С"* для анализа промышленных газовых выбросов, может применяться во взрывобезопасных помещениях. Прибор работает на базе ИК-оптического модуля (CO, CO_2, CH_4) с использованием электрохимических сенсоров NO и O_2, оснащен интерфейсом PS-232. Расход газовой смеси, подаваемой специальным насосом, 1 дм^3/мин, потребляемая мощность 60 Вт, питающее напряжение 220 В. Габаритные размеры измерительного блока 482 × × 410 × 132 мм, масса 7 кг. Газоанализатор эксплуатируется при температуре окружающей среды 5—40 °С, давлении 84— 106,7 кПа и влажности до 95 %.

Предприятие "Радио-сервис" (Ижевск) — оригинальные измерительные приборы:

— *цифровой мегаометр Е6-24* (рис. 3) для измерения сопротивления изоляции электрических цепей, не находящихся под напряжением, и измерения напряжения до 400 В. Включенный прибор постоянно находится в режиме измерения напряжения. Измерение сопротивления производится нажатием соответствующей кнопки и не требует переключения режимов. При измерении сопротивления изоляции более одной минуты прибор автоматически рассчитывает коэффициент абсорбции и сохраняет его в памяти. В памяти также хранятся результат последнего замера и сопротивление изоляции за 15 с. Все измеренные параметры можно вывести на дисплей. Текущее значение напряжения отображается на светодиодном индикаторе, расположенном на лицевой панели прибора. Питание прибора осуществляется от аккумуляторной батареи или сети переменного тока через адаптер, служащий для зарядки аккумулятора. Прибором можно измерять напряжение 100, 250, 500 и 1000 В и сопротивление изоляции до 1 ГОм. Работает при температуре –30—50 °С, потребляемая мощность 6 Вт. Габаритные размеры 80 × 120 × 250 мм, масса 1,2 кг;

— *трассоискатель "Сталкер"* для определения местоположения и глубины залегания силовых и сигнальных кабелей, трубопроводов на глубине до 10 м и удалении до 10 км от места подключения генератора, определения мест повреждений изоляции трубопроводов и кабелей, обследования участков местности перед проведением земляных работ, поиска пар проводов в сигнальных кабелях. Бесконтактный датчик контроля изоляции ДКИ-03, входящий в состав трассоискателя, предназначен для определения места повреждения в условиях мерзлого грунта, под асфальтом и снегом;

— *преобразователь силы арматурный струнный* для измерения статических усилий растяжения в арматуре железобетонных конструкций энергетических сооружений в процессе натурных исследований их напряженно-деформированного состояния. Преобразователь состоит из упругого корпуса, обеспечивающего преобразование измеряемой силы в деформацию; струнного преобразовательного элемента, преобразующего деформацию струны в электрический частотно-модулированный выходной сигнал; штуцера, обеспечивающего герметичное соединение выводов электромагнитной головки с кабелем; удлинительных арматурных стержней, служащих для установки преобразователя в арматуру. Силы, воздействующие на арматуру, вызывают деформацию корпуса преобразователя, которая передается струнному преобразовательному элементу и вызывает изменение частоты выходного сигнала. Диапазон измерения усилий растяжения 0—80, 0—160 и 0—320 кН. Размеры стержней арматуры: диаметр — 20, 28 и 40 мм, длина — 600 мм.

НПО "ЮМАС" (Москва) — манометры различного назначения и другие вспомогательные устройства:

— *общетехнический манометр МП 250 Н* для измерения избыточного давления неагрессивных, некристаллизующихся сред (жидкости, пара, газа, в том числе кислорода, ацетилена, пропан-бутана). Класс точности прибора 1, диаметр корпуса 250 мм, предел измерения 0—100 МПа;

Коррозионно-стойкий манометр МП63НЛН для измерения вакуумметрического и избыточного давлений некристаллизующихся сред, не вступающих в активное взаимодействие с коррозионно-стойкой сталью. Диаметр корпуса 63 мм, класс точности 1,5, пределы измерений 0—1,5 МПа;

— *манометр повышенной точности МП160МЦ* для контроля работоспособности общетехнических манометров, а также измерения давления жидких и газообразных веществ с повышенной точностью, класс точности 1, пределы измерений 0—40 МПа;

— *эталонный тягонапоромер НП160Н-0,25* (рис. 4) для поверки технологических измерителей давления, отсчета измерений малых давлений с высокой точностью. Класс точности

Рис. 2. Газоанализатор "КАСКАД-200"

Рис. 3. Цифровой мегаометр Е6-24/1

Рис. 4. Эталонный тягонапоромер НП160Н-0,25

0,25, пределы измерений до 100 кПа, диаметр корпуса 160 мм;

— *автомобильный манометрический индикатор МИА 63/2* для индикации избыточного давления масел, воды, сжатого воздуха в системах автомобильного транспорта с пределом измерения 0—100 МПа;

— *виброустойчивый электроконтактный манометр ЭКМ160НВм* для замыкания и размыкания электрических цепей при достижении заданного предела давления. Обеспечивает визуальную индикацию контролируемого давления в условиях повышенной вибрации и пульсации измеряемой среды. Диаметр корпуса 160 мм, класс точности 2,5, пределы измерений 0—6 МПа.

ЗАО "Компания НТНК" (Москва) — стационарные, встраиваемые в технологическую линию переносные и другие твердомеры, разработанные за рубежом:

— *портативный твердомер Heady esatest,* принцип работы которого основан на измерении электрического сопротивления. Алмазный индентор имеет тонкое токопроводящее покрытие. При вдавливании индентора сопротивление электрической цепи изменяется в зависимости от глубины. Такой метод измерения твердости позволяет проводить измерения в труднодоступных точках, на деталях больших и малых размеров, различных формах поверхности, внутренних поверхностях, зубьях шестерен и др. Твердомер имеет возможность распечатки результатов измерений, проведения серии испытаний с моментальным вычислением среднего значения и отклонения с выводом на цифровой жидкокристаллический дисплей с подсветкой размером 80 × 30 мм. Максимальная величина нагрузки 9,81—98,1 Н задается с клавиатуры. Объем памяти прибора 1000 измерений, питающее напряжение 110—220 В или от батарейки, работающей в течение 8 ч беспрерывной работы;

— *универсальная испытательная машина Quasar 2,5* с диапазоном нагрузок 2,5—2000 кН (рис. 5). Машина сконструирована с учетом требований к проведению механических испытаний различных материалов и изделий из них на растяжение, сжатие, изгиб и т. п. Испытания проходят по заданной программе, что позволяет хранить данные, вычислять и печатать результаты измерений. Полное управление и измерение осуществляются от компьютера с клавиатуры пульта управления. Питающее напряжение твердомера 110—230 В, рабочая температура 10—50 °С. Прибор имеет память на 4700 измерений.

ООО "Сенсорика-М" (Самара) — различное измерительное оборудование, разработанное в Германии:

— *бесконтактный лазерный линейный датчик профиля scan CONTROL2800*

Рис. 5. Универсальная испытательная машина Quasar 2,5

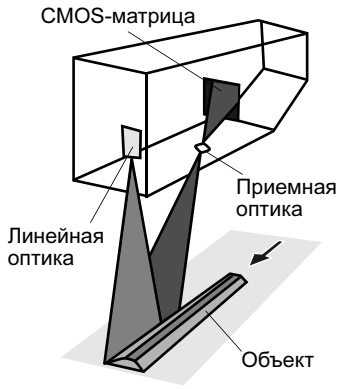


Рис. 6. Принцип работы датчика scanCONTROL2800

(рис. 6), использующий принцип оптической триангуляции для двумерного контроля профиля различных объектов. В противоположность точечным лазерным датчикам на поверхности объекта с помощью линейной оптики проецируется лазерная линия. Отраженный свет через высококачественную оптику отображается на CMOS- матрице и обрабатывается в двух измерениях. Вместе с информацией о расстоянии регистрируется также точное положение каждой точки лазерной линии, с помощью контроллера производится обработка результатов. Датчик профиля состоит из измерительной головки и интеллектуального контроллера, соединенных между собой кабелем. Контроллер выдает информацию о профиле в двух измерениях. Интегрированный интерфейс допускает управление системой от компьютера и высокую скорость обработки данных в широком частотном диапазоне. Возможно управление несколькими системами с помощью одного компьютера;

— *optoCONTROL2500-35* для выполнения бесконтактных и высокодинамичных измерений на движущихся конвейерах, экструзионных линиях, волочильных установках, в механизмах и автоматизированном производстве.

Выставка прошла с большим успехом, были заключены деловые соглашения между представителями различных фирм. Ее посетило большое число специалистов.

А. Н. Иванов, инж.

Издательский центр “Технология машиностроения”

127018, Москва, ул. Октябрьская, 35

Сдано в набор 28.12.2006. Подписано в печать 12.02.2007. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 14,21. Заказ 03/07.

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”, 127238, Москва, Дмитровское ш., 58, тел./факс: (495) 482 5590.

Подписные индексы журнала “Технология машиностроения”:

79494 в каталоге Агентства “Роспечать” **27869** в Объединенном каталоге “Пресса России” **60190** в каталоге “Почта России”