ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ, НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

8 (62) Август 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
М. Г. Джавадян

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 НПО «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

Хорев А. И. — Основы создания слоистых композиционных материалов из титановых сплавов **5**

ЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Анахов С. В., Сингер К., Пыкин Ю. А., Шакуров С. А., Матушкин А. В. — Исследование поверхности реза при термической разделительной резке стали 09Г2С **10**

ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Иванов В. С., Васильев Г. Н., Зубков Н. Н., Иванов Д. В. — Моделирование процесса формообразования при получении щелевых структур вращающимся лезвийным инструментом **14**

Оськин Д. А., Масягин В. Б. Совершенствование расчета технологических размеров на основе выявления обратных связей между допусками и условиями обработки **18**

Тарнопольский А. В. — Вихревой способ подготовки и подачи СОТС в виде воздушно-жидкостного аэрозоля при обработке резанием **23**

СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Кученченко Е. А., Астахова Т. А., Бабылов Д. А., Феофанов А. Н. — Разработка автоматизированной подсистемы ведения описания узлов агрегатных станков и автоматических линий. **26**

Неверов В. В., Карих В. В., Носов В. А. — Технология изготовления биметаллических дисковых и кромкокрошительных ножей **27**

МЕХАНОСБОРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Кондратенко Л. А. — Оценка работоспособности рабочих органов роликовой вальцовки **30**

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Штрикман М. М. — Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (аналитический обзор). Ч. I **34**

ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Аверченко В. А., Головин С. И., Попович Л. Г., Пузряков А. А., Пузряков А. Ф. — Воздушно-плазменное напыление коррозионно-стойких покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена **40**

Ермолаева Г. Б., Кузнецов Э. А. — Расширение возможностей декоративной отделки деталей в черный цвет **44**

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЙ

Макаренко В. Д., Горбунов С. И., Огородников В. В., Бакеев Р. Б., Шевцов В. Л. — Причины отказов технологического оборудования газоперерабатывающих заводов Западной Сибири. **45**

МЕТРОЛОГИЯ

Неделько А. Ю. — Использование оптоволокна в оптической системе пирометров **49**

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ИСПЫТАНИЯ

Джаганян А. В., Лепеха В. Л. — Портативный вихретоковый дефектоскоп ВДЗ-71. . . . . **53**

АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Большаков Н. С. — Опыт использования компьютерной системы "Анализ кинематики и работоспособности" при автоматизированном проектировании и исследовании сложных механических систем **56**

Хасанов З. М., Хасанов О. З. — Методика моделирования адаптивной системы управления автоматизированным электроприводом методом эквивалентных структурных преобразований. **58**

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Каргапольцев В. П., Симахин И. Я. — Энергосбережение с применением защитного мониторинга электродвигателей **68**

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА

Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Средства информационной поддержки жизненного цикла продукции. Безопасность информации. Основные положения и общие требования (ГОСТ Р 52611—2006) **70**

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Клочков В. В., Сазонов Д. И. — Экономические проблемы организации виртуальных машиностроительных предприятий. **73**

Ярхов Ю. Б., Галетко Е. В. — Управление качеством продукции и трудовыми ресурсами **77**

Орсик Л. С., Федоров А. А. — Экспертные оценки для организации процесса управления инвестиционными ресурсами предприятия **80**

ОБРАЗОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Сильченко Т. В. — Методы и алгоритмы контроля управления качеством образования в высших технических учебных заведениях **82**

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Потапова Г. С. — Содержание зарубежных журналов **90**

ИНФОРМАЦИЯ

Иванов А. Н. — 2-я Международная специализированная выставка "ВакуумтехЭкспо—2007" **94**

Календарь выставок на IV квартал 2007 г. **97**

TEKHNOLOGIYA MASHINOSTROENIYA

REVIEW-ANALYTICAL, SCIENTIFIC-TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

8 (62) August 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
M. G. Dzhavadyan

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

Khorev A. I. — Fundamental development of sandwiched composites from titanium alloys 5

BLANK PRODUCTION

Anakhov S. V., Singer K., Pykin Yu. A., Shakurov S. A., Matushkin A. V. — Cut surface study at steel 09Г2С thermal separating cutting 10

FORMING TECHNOLOGIES

Ivanov V. S. et al. — Forming process simulation at slotted structure obtaining by revolving cut 14

Oskin D. A., Masyagin V. B. — Development of the technological sizes calculation on the base of feedback recognition between tolerance and machining conditions 18

Tarnapolsky A. V. — Vortical practice of lubricating technical coolers preparation and feeding as air-liquid-spring spray at cutting 23

TOOLING PRODUCTION

Kuchenchenko Ye. A., Actakhova T. A., Babylov D. A., Feofanov A. N. — Automatical subsystem development for automated line and multihead machine units' description conduction 26

Neverov V. V., Karikh V. V., Nosov V. A. — Bimetal disk and scrap cutters fabrication method 27

MACHINING-AND-ASSEMBLY PRODUCTION

Kondratenko L. A. — Roll expander executive member working capacity estimation 30

PERMANENT JOINTS PRODUCTION TECHNOLOGY

Shtrikman M. M. — Linear joints friction welding process state and development: Review 34

MODIFEING PROCESSES OF MACHINE PARTS SURFACES

Averchenko V. A., Golovin S. I., Popovich L. G., Pouzryakov A. A., Pouzryakov A. F. — Superhighmolecular polythene sputtering to protect oil-and-gas and chemical equipment from corrosive medium factors. 40

Yermolayeva G. B., Kuznetsov E. A. — Enhancement of components' ornamental dressing in black 44

SPECIAL TECHNOLOGIES

Makarenko V. D., Gorbounov S. I., Ogorodnikov V. V. — Processing equipment failure reasons at gas-transferring works in Western Siberia. 45

METROLOGY

Nedelko A. Yu. — Optical fiber application in pyrometers optical system 49

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

Jaganyan A. V., Lepekha V. L. — The ВДЗ-71 portable vortex-current fault indicator 53

PROCESSES AUTOMATION AND COMPUTERIZATION

Bolshakov N. S. — The "Kinematics and serviceability analysis" computing system application practice at computer-aided design and studying complex mechanical systems 56

Khasanov Z. M., Khasanov O. Z. — Modelling procedure of automatic electric drive adaptive control system for equivalent structural transformation methods. 58

POWER INDUSTRY

Kargapoltsev V. P., Simakhin I. Ya. — Power saving applying power station protective monitoring 68

STANDARDIZATION, CERTIFICATION, QUALITY SYSTEMS

Industrial automation systems and their integration. Production life cycle infotainment means. Information safety. Basic definitions and general requirements (GOST R 52611—2006) 70

ECONOMICS AND PRODUCTION ORGANIZATION

Klochkov V. V., Sazonov D. I. — Economic questions of machine industry virtual enterprise foundation 73

Yarkhov Yu. B., Galetko Ye. V. — Managing quality of products and labour resources 77

Orsik L. S., Fedorov A. A. — Expert judgements on the enterprise investment resources managing process arrangement 80

EDUCATION AND PERSONNEL TRAINING

Silchenko T. V. — Inspection methods and algorithms of education quality management in the higt technical educational institutions 82

FOREIGN EXPERIENCE

Potapova G. S. — Foreign journals contents 90

INFORMATION

Ivanov A. N. — The 2nd International specialized exhibition "Vacuumtechexpo'2007". 94

Exhibition calendar for October — December, 2007 97

А. И. ХОРЕВ, д-р техн. наук
ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ

Основы создания слоистых композиционных материалов из титановых сплавов

Процесс изготовления КМ из конструкционных титановых сплавов

Повышение прочности титановых сплавов традиционными методами легирования и термической обработки связано, как правило, с понижением пластичности и опасностью хрупкого разрушения. Вместе с тем имеется возможность одновременно повысить прочность и пластичность титановых сплавов путем создания из них композиционных материалов. Новый класс композиционных материалов представляет собой сочетание хотя бы двух химически разнородных составляющих с четкой границей раздела между ними. Композиционные материалы, состоящие из слоев титановых сплавов различных химического и фазового составов, соответствуют этим признакам. Было исследовано влияние числа и чередования слоев, а также содержания прочной и мягкой составляющих на механические свойства композиционных материалов из титановых сплавов. Необходимость такого исследования вызвана тем, что между количественным соотношением составляющих и механическими свойствами композиции отсутствует линейная зависимость, и подсчет прочности и пластичности композиционных материалов по закону комбинированного действия в ряде случаев оказывается невозможным.

Для исследуемых композиций в качестве прочной составляющей разработаны сплавы ВТ23[1] и ВТ15-1[2], а в качестве мягкой составляющей — сплав ОТ4[3] [1—9].

Сплав ВТ23 — комплексно-легированный (α + β)-титановый сплав системы Ti—Al—Mo—V—Cr—Fe, закаливающийся на α-фазу, обладающую высокой пластичностью.

Сплав ВТ15-1 (ВТ15) — β-титановый сплав системы Ti—Al—Mo—Cr—Zr, закаливающийся на β-фазу, обладающую высокой пластичностью. Сплав содержит модифицирующую добавку Zr (1 %), обеспечивающую повышение уровня и стабильности механических свойств.

Сплав ОТ4 — псевдо-α-титановый сплав системы Ti—Al—Mn, содержащий 5 % β-фазы.

Образцы для испытаний получали из слитков сплавов массой 40 кг, которые после ковки на плиты прокатывали в листы необходимой толщины. Вырезанные из листов карточки размером 200 × 300 мм после травления и очистки бензином и спиртом собирали в пакеты толщиной 30 мм с заданным сочетанием слоев. Пакеты подвергали диффузионному сращиванию в вакуумной печи при 880 °С в течение 2 ч, а затем обваривали по периметру аргонодуговой сваркой с присадочной проволокой ВТ1. Затем их нагревали до 1100 °С и прокатывали в горячем состоянии на толщину с 30 до 15 мм за четыре прохода. Полученные листы подвергали травлению, нагревали до 800 °С и прокатывали до толщины 5 мм. После пескоструйной очистки и травления часть листов снова нагревали до 800 °С и прокатывали до толщины 2 мм и также подвергали пескоструйной очистке и травлению.

Механические свойства КМ с высокопрочной составляющей из (α + β)-сплава ВТ23. Уровень механических свойств композиционных листовых материалов существенно зависит от качества подготовки поверхностей, составляющих эту композицию. Наличие на их поверхности газонасыщенного альфированного слоя, обнаруживаемого при металлографическом анализе, приводит к значительному снижению механических свойств композиционного материала, особенно пластичности. Так как приграничные зоны определяют способность "залечивать" образующиеся на поверхности прочной составляющей дефекты, то контакт этой составляющей с еще менее пластичным газонасыщенным слоем может усилить влияние дефектов. Этим обусловлена необходимость тщательной подготовки составляющих для композитных многослойных материалов.

Механические свойства композиционных материалов зависят и от качества соединения между слоями. Многослойный композиционный материал можно рассматривать как искусственно созданный гетерогенный материал, прочность которого должна повышаться с увеличением протяженности границ между слоями. В дисперсионно-упрочненных при термической обработке титановых сплавах упрочнение определяется протяженностью межфазовых границ и фазовым наклепом, знак напряжения которого может совпадать со знаком напряжения от внешнего нагружения, что связано с опасностью перенапряжения отдельных фазовых составляющих. В многослойном гетерогенном материале практически отсутствуют напряжения на границах слоев, поэтому высокое качество соединения позволит превысить средние или суммарные показатели механических свойств отдельных составляющих. Так как

[1] Патент 1131234 (РФ).
[2] Патент 490856 (РФ).
[3] Патент 2086694 (РФ).

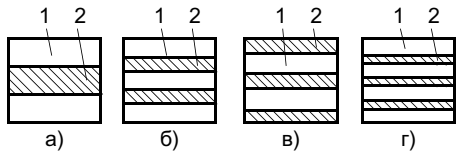


Рис. 1. Трех- (*а*), пяти- (*б*, *в*) и семислойная (*г*) схемы композиций титановых сплавов:
1, *2* — мягкая (сплав ОТ4) и прочная (сплав ВТ23 или ВТ15) составляющие соответственно

наличие слоя мягкой составляющей оказывает влияние только на поверхностные дефекты, то механические свойства композиции должны повышаться с увеличением числа слоев и уменьшением толщины слоя прочной составляющей. С другой стороны, увеличение числа слоев сопровождается увеличением межслойных границ и, следовательно, дефектов технологии изготовления композиции. Для каждой композиции существует некоторый оптимум, определяемый количественным соотношением составляющих различной прочности, числом и толщиной их слоев. Были испытаны трех-, пяти- и семислойные композиции (рис. 1), в которых доля прочной составляющей, определяемая суммарной толщиной слоев, составляла 30, 50, 70 и 90 %.

Кроме того, испытывали монолитные образцы сплавов, выбранных в качестве прочной и мягкой составляющих (рис. 2). Испытаниям при одноосном растяжении подвергали гладкие образцы толщиной 5 и шириной 6 мм в рабочей части и образцы с двусторонними поверхностным выточками глубиной 1 мм и радиусом 0,75 мм, заканчивающимися в слое мягкой или прочной составляющей. Для определения ударной вязкости испытывали образцы сечением 5 × 5 мм с круглым (r = 0,75 мм) надрезом глубиной 1 мм. Надрез наносили с торца через все слои, а с необработанной поверхности — через один или два слоя. В условиях двухосного растяжения испытания проводили на гладких образцах и образцах с надрезом глубиной 0,1 мм и длиной 10 мм по направлению прокатки. На рис. 2 приведены результаты испытаний образцов композиционного материала (ОТ4 + ВТ23) толщиной 5 мм после отжига при 750 °С в течение 25 мин и охлаждения на воздухе. Как видно, при одинаковом содержании прочной составляющей композиционный материал, состоящий из бóльшего числа слоев, обладает большей пластичностью. Это объясняется лучшей проработкой структуры тонкого слоя и бóльшей пластификацией прочной составляющей, находящейся в контакте с мягкой, пластичные слои которой ограничивают развитие трещин, возникающих или имеющихся в слое прочной составляющей. При нагружении образцов композиционного материала напряжения в его мягких слоях возрастают до момента начала пластической деформации прочных слоев, на поверхности слоев прочных составляющих образуются трещины, однако их распространение по фронту и в глубину сдерживается упрочнением мягких слоев. Этим ослабляется действие трещин как концентраторов напряжений, замедленное развитие трещин ведет к повышению равномерности пластической деформации слоев прочных составляющих. При недостаточной прочности соединения слоев композиции или нарушении сцепления между ними возможно снижение механических характеристик композиционного материала.

Отмечено, что пятислойные композиции с мягкими слоями на поверхности образцов (см. рис. 1, *б*) обладают более высокой прочностью и пластичностью, чем композиции, имеющие на поверхности образцов слои прочной составляющей (см. рис. 1, *в*). Прочность композиционных материалов возрастает с увеличением доли прочной составляющей, причем прочность композиции, содержащей 70—90 % сплава ВТ23, близка к прочности сплава ВТ23. Последнее связано с тем, что снижение прочности от введения мягкой составляющей компенсируется упрочнением сплавов на границах между слоями.

Пластичность композиционных материалов по мере увеличения содержания прочной составляющей снижается, однако эта зависимость далека от прямолинейной. Так, пластичность пяти- и трехслойной композиций, содержащих 90 % сплава ВТ23, значительно выше, чем у монолитного образца сплава ВТ23. Бóльшая пластичность таких композиций

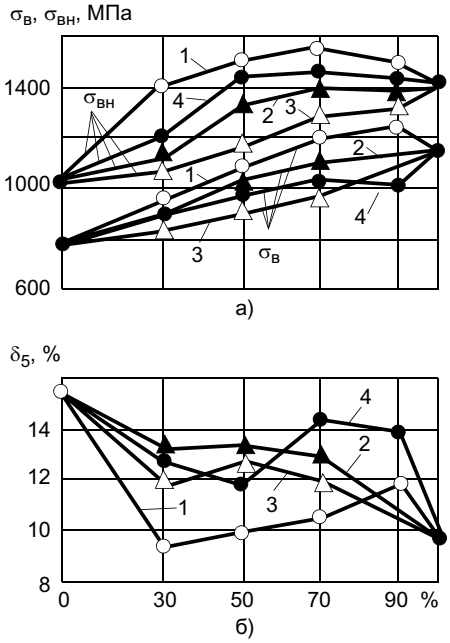


Рис. 2. Зависимость предела прочности гладких образцов $\sigma_в$ и образцов с надрезом $\sigma_{вн}$ из титановых сплавов (*а*) и их относительного удлинения δ_5 (*б*) после отжига и охлаждения на воздухе от содержания прочностной составляющей ВТ23 при трех- (*1*), пяти- (*2*) (по схеме рис. 1, *б*), пяти- (*3*) (по схеме рис. 1, *в*) и семислойной (*4*) композициях

по сравнению со сплавом ВТ23 объясняется сдерживанием мягкими слоями раскрытия трещин на поверхности высокопрочных составляющих, что задерживает разрушение материала и приводит к повышению равномерной пластической деформации. Низкая пластичность трехслойной композиции, содержащей 30 % сплава ВТ23, обусловлена, по-видимому, недостаточно тщательной подготовкой образцов и независимой работой каждого слоя большой толщины. Увеличение содержания мягкой составляющей в многослойной композиции приводит, с одной стороны, к понижению механических характеристик в результате различия пределов упругости составляющих и перегрузки в процессе испытания прочной составляющей на последних стадиях нагружения, а с другой — препятствует хрупкому разрушению и повышает пластичность. Как показали испытания, для трехслойной композиции, содержащей примерно равные и относительно большой толщины слои прочной и мягкой составляющих, определяющим стал фактор различия их пределов упругости. Испытания образцов с двусторонним поверхностным надрезом показали, что в отожженном состоянии наибольшей прочностью в надрезе обладает трехслойная композиция, содержащая 70 % сплава ВТ23, и семислойная композиция, содержащая 50—70 % сплава ВТ23. Пятислойные композиции (см. рис. 1, *а*) имели прочность в надрезе несколько меньшую, чем композиции, приведенные на рис. 1, *б*. Для композиций в термически упрочненном состоянии, так же как и для отожженных, прочность с увеличением содержания сплава ВТ23 возрастает, а пластичность снижается (рис. 3).

При этом предел прочности, полученный на гладких образцах, достигает наибольшего значения для композиций, содержащих 90 % сплава ВТ23, а на образцах с двусторонним надрезом для композиций, содержащих 50 % сплава ВТ23, превышает предел прочности, полученный на монолитных образцах сплава в первом случае на 100—150, а во втором — на 200 МПа. Ударная вязкость композиций, полученная на образцах как с поверхностными, так и с торцевыми надрезами, снижается по мере увеличения содержания сплава ВТ23 (рис. 4), причем для композиций в отожженном состоянии эта тенденция выражена более сильно. Трехслойные композиции обладают меньшей ударной вязкостью, чем семислойные.

Повышение прочности композиций по сравнению с монолитным сплавом ВТ23 объясняется их меньшей чувствительностью к поверхностным дефектам и концентраторам напряжения. При испытаниях композиционных материалов установлено, что трехслойные композиции, содержащие 50—70 % сплава ВТ23, при толщине листа 2 мм более пластичны, чем при 5 мм; это объясняется лучшими условиями пластификации прочной составляющей в тонком слое. Испытания композиционных материалов при толщине листа 2 мм в условиях двухосного растяжения показали, что семислойные композиции, содержащие 70—90 % сплава ВТ23, обладают на 100—150 МПа большей конструкционной прочностью, чем образцы из монолитного сплава ВТ23 (рис. 5). Материал в высокопрочном состоянии, особенно работающий в условиях

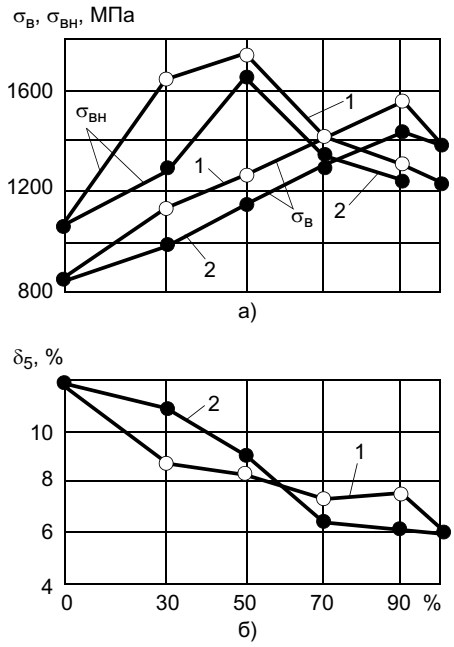


Рис. 3. Зависимость предела прочности $\sigma_в$ гладких образцов и образцов с надрезом $\sigma_{вн}$ (*а*) из титановых сплавов и их относительного удлинения δ_5 (*б*) после закалки при 775 °С и старения при 450 °С в течение 10 ч от содержания прочностной составляющей сплава ВТ23: *1*, *2* — трех- и семислойная композиции соответственно

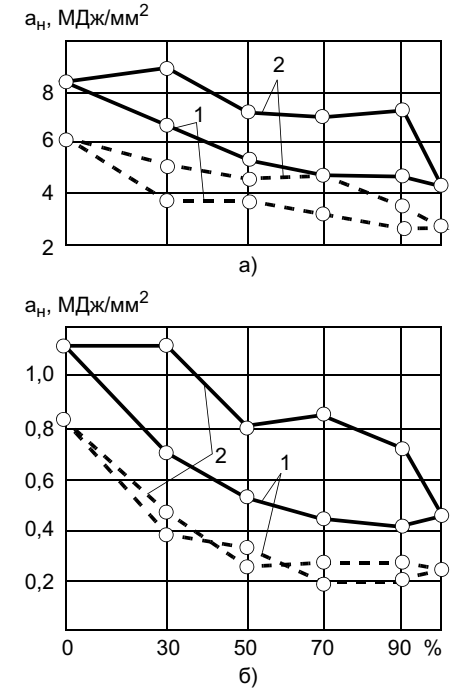


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости $a_н$ образцов титановых сплавов ОТ4 + ВТ23 с поверхностным (*а*) и торцевым (*б*) надрезами после отжига при 750 °С в течении 25 мин и охлаждения на воздухе (сплошные линии) и закалки при 770 °С и старения при 450 °С в течении 10 ч (штриховые) от содержания прочностной составляющей ВТ23 (*1*, *2* — обозначения см. рис. 3)

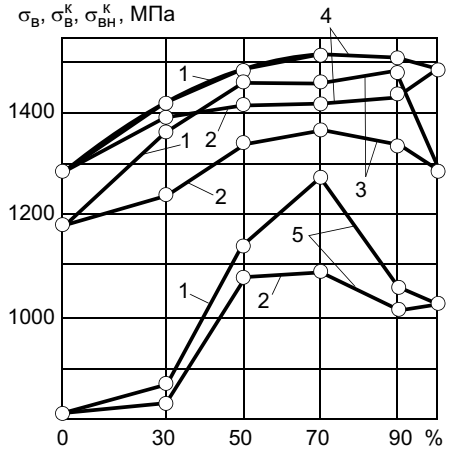


Рис. 5. Зависимость предела прочности $\sigma_в$ (*3*) и конструкционной прочности $\sigma^к_в$ гладких образцов (*4*) и образцов с надрезом $\sigma^к_{вн}$ при двухосном растяжении композиций титановых сплавов ОТ4 + ВТ23 после отжига при 750 °С в течение 25 мин и охлаждения на воздухе в зависимости от содержания в них прочной составляющей ВТ23 (*1*, *2* — обозначения см. рис. 3)

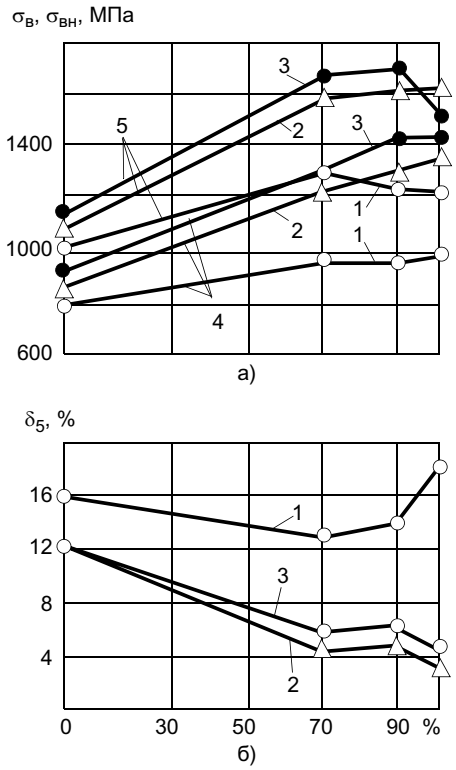


Рис. 6. Зависимость предела прочности $\sigma_в$ гладких образцов (*4*) и образцов с надрезом $\sigma_{вн}$ (5) (*а*) и относительного удлинения δ_5 (*б*) образцов трехслойных композиций титановых сплавов от содержания прочной составляющей ВТ15-1 и состояния образцов: *1* — после отжига при 800 °С; *2* — после закалки при 800 °С и старения при 480 °С (10 ч) и 560 °С (15 мин); *3* — то же, но после старения при 480 °С в течение 25 ч

двухосного растяжения, обладает высокой чувствительностью к поверхностным дефектам. Пластичные слои на поверхности и внутри композиции затрудняют распространение трещин от дефектов и уменьшают чувствительность к поверхностным повреждениям. Лучшие результаты показала композиция ВТ23 (0,34 мм × 4 слоя) + ОТ4 (0,1 мм × 5 слоев), содержащая 73 % сплава ВТ23 и 27 % сплава ОТ4.

Механические свойства КМ с высокопрочной составляющей из β-сплава ВТ15-1. Были проведены испытания композиций сплавов ОТ4 + ВТ15-1 при толщине листов 5 мм (рис. 6). В термически упрочненном состоянии прочность композиций с увеличением доли прочной составляющей ВТ15-1 возрастает, а пластичность снижается. Композиции, содержащие 90 % сплава ВТ15-1, имеют равную прочность со сплавом ВТ15-1 и более высокую пластичность. Исследования листов толщиной 2 мм из композиции сплавов ОТ4 + ВТ15-1 показали, что в термически упрочненном состоянии при прочности, близкой к прочности монолита ВТ15-1, трехслойные композиции имеют в 1,5—2 раза бóльшую пластичность, что объясняется более заметным влиянием состояния поверхности в тонких листах, чем в толстых [1—2].

Для каждого из рассмотренных композиционных материалов в конкретных условиях применения существует оптимум, определяющий количественное соотношение составляющих, а также толщину и число их слоев. Конструкция композиции определяется требуемым уровнем прочности, и чем этот уровень выше, тем выше должна быть прочность каждой из составляющих; коэффициентом запаса прочности конструкции, предусматривающим сохранение работоспособности конструкции при разрушении одного из высокопрочных слоев; толщиной композиционного материала, при уменьшении которой должна уменьшаться толщина прочной составляющей. Толщина слоев прочной составляющей должна быть меньше критической длины трещины, так как в противном случае начавшееся лавинное разрушение в одном из этих слоев не может быть остановлено на его границе со слоем мягкой составляющей. Способность композиции к локализации трещин на некоторой стадии их развития зависит также от механических свойств мягкой составляющей и ее пластифицирующего воздействия на прочную составляющую.

Теоретическое обоснование улучшения механических и технологических свойств слоистых композиционных материалов. Улучшение механических свойств слоистых композиционных материалов связанно со следующими факторами.

Прочность КМ возрастает в связи с дополнительным упрочнением границами между слоями. Она повышается с увеличением протяженности границ между слоями при практическом отсутствии напряжений на границах слоев, поэтому прочность КМ превышает прочность составляющих композиции.

Улучшение механических и технологических свойств КМ связанно с хорошей проработкой структуры в более тонких слоях и созданием сверхмелкой структуры, обес-

печивающей повышенный предел прочности и пластичности составляющих КМ слоев.

Улучшение механических и технологических свойств КМ связанно с пластифицирующим эффектом мягкой и менее прочной составляющей, обеспечивающей бóльшую величину равномерной пластической деформации, а следовательно, и лучшую деформируемость при штамповке и гибе и предотвращающей развитие трещин на ранних стадиях нагружения и деформации. Таким образом, происходит торможение трещин на границе высокопрочной и высокопластичной составляющих КМ. Пластичные слои ограничивают также развитие трещин, образующихся на поверхности высокопрочного слоя.

Применение КМ в конструкциях. Для изготовления шаровых газовых баллонов повышенной надежности рекомендован композиционный материал, состоящий из четырех слоев сплава ОТ4 и трех слоев сплава ВТ23 при содержании прочной составляющей 80 % (см. рис. 1, *г*). Промышленное опробование композиции при толщине листа 6 мм показало, что она обладает бóльшими, чем монолитные листы, технологической пластичностью при штамповке, упрочнением при двухосном растяжении и надежностью при циклических нагрузках.

Многослойные композиционные материалы перспективны для изготовления цилиндрических и сферических емкостей. Сварку листов рекомендуется производить в утолщенных зонах, полученных утонением основного материала путем химического фрезерования или механической обработки; после общей упрочняющей обработки емкости зону сварного соединения целесообразно подвергать местному отжигу. При нагружении это переводит вероятность разрушения конструкции из зоны сварного соединения в область основного материала, состоящего из слоев титановых сплавов.

Разработан процесс изготовления листов из сплава ВТ23, плакированных техническим титаном ВТ1-0, и освоено их промышленное производство. Плакированные листы, состоящие из высокопрочного (α + β)-сплава ВТ23 и поверхностных листов из пластичного α-сплава ВТ1-0, являются фактически композиционным слоистым материалом. Поверхностные пластичные слои обеспечивают повышение технологической пластичности и уменьшают наводороживание (α + β)-сплава ВТ23, который больше склонен к наводороживанию, чем α-сплав ВТ1-0.

По проблеме конструкционных материалов автором разработаны 24 титановых сплава, 7 композиционных материалов на основе титана, созданы 227 технологических процессов, опубликованы 4 монографии, более 200 статей, получены 326 патентов и авторских свидетельств на изобретение, более 200 из которых применены, 74 вошли в состав лицензий, проданных за рубеж.

ВЫВОДЫ

1. На основе разработанной теории комплексного легирования и модифицирования созданы конструкционные титановые сплавы ВТ23 и ВТ15-1, эффективно упрочняемые термической обработкой, которые приняты в качестве высокопрочных составляющих композиций.

2. Композиционные материалы, состоящие из слоев высокопрочного, но недостаточно пластичного титанового сплава и титанового сплава средней прочности, но отличающегося высокой пластичностью, при соответствующей технологии изготовления обладают более высокими показателями прочности и пластичности, чем входящий в композицию высокопрочный сплав.

3. Исследованием композиций, составленных из сплавов ВТ23 или ВТ15-1 в качестве прочной составляющей и сплава ОТ4 в качестве мягкой составляющей, установлено, что с увеличением числа слоев и уменьшением их толщины пластичность композиции повышается. Композиции с расположенными на поверхности слоями мягкой составляющей обладают более высокой прочностью и пластичностью, чем композиции, имеющие на поверхности слои прочной составляющей. Композиционные материалы характеризуются меньшей чувствительностью к надрезу при осевом и двухосном растяжениях и бóльшей ударной вязкостью, чем входящий в их состав в качестве прочной составляющей высокопрочный титановый сплав.

4. Оптимальный уровень механических свойств показали семислойные композиции, содержащие 70—90 % сплава ВТ23.

5. Разработанный высокопрочный композиционный материал с пластичными слоями на поверхности состоит из семи-девяти слоев титановых сплавов ОТ4 и ВТ23 и содержит 70—90 % сплава ВТ23.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хорев А. И.* Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1979. 228 с.
2. *Хорев М. А.* Структурно-фазовые состояния и надежность сварных соединений титановых сплавов. М.: НПО "ВИАМ", 1991. 107 с.
3. *Хорев М. А.* Упрочнение сварных соединений титановых сплавов, полученных электронно-лучевой сваркой // МиТОМ. 1985. № 1. С. 52—54.
4. *Хорев М. А.* Дендритная ликвация в металле шва сварных соединений титановых сплавов // Сварочное производство. 1989. № 5. С. 37—39.
5. *Металловедение* титана и его сплавов / С. П. Белов, А. И. Хорев, М. А. Хорев и др. М.: Металлургия, 1992. 352 с.
6. *Хорев А. И., Хорев М. А.* Титановые сплавы и технологические процессы для космической техники и народного хозяйства // Титан. 1993. № 4. С. 70—75.
7. *Хорев А. И., Хорев М. А.* Современные титановые сплавы в авиакосмической технике // Авиакосмическая техника и технология. 1997. № 1. С. 15—22.
8. *Хорев М. А., Хорев А. И.* Титановые сплавы, их применение и перспективы развития // Материаловедение. 2005. № 7. С. 25—34.
9. *Хорев А. И.* Механические свойства сварных соединений (α + β)- и β-титановых сплавов // Титан. 2005. С. 275—285.

С. В. АНАХОВ, канд. физ.-мат. наук
(РГППУ, Екатеринбург),
К. СИНГЕР
(DESY – Deutsche Ekektronen Synhrotron, Гамбург, Германия),
Ю. А. ПЫКИН, д-р техн. наук
(НПП "Полигон", Екатеринбург),
С. А. ШАКУРОВ, инж., А. В. МАТУШКИН, инж.
(УГТУ-УПИ, Екатеринбург)

Исследование поверхности реза при термической разделительной резке стали 09Г2С

В работе представлены сравнительные результаты исследований качественных показателей поверхности реза при термических способах разделительной резки стали 09Г2С, применяемой для производства сварных конструкций в строительстве и на магистральных трубопроводах в условиях низких температур. Основная задача исследований предполагает выбор рациональных способов, режимов и оборудования при разработке технологии разделительной резки низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей.

Объектом исследований являются широко применяемые на производстве способы термической обработки низкоуглеродистых сталей — воздушно-плазменная и газокислородная резка. Газокислородную резку выполняли универсальным резаком РЗР-62 с внутренним мундштуком № 2 и наружным — № 1; в качестве горючего газа применяли пропан. Воздушно-плазменную резку выполняли на оборудовании, разработанном в НПП "Полигон" для механизированной (плазмотрон ПМВР-М) и ручной (плазмотрон ПВР-М) резки листового и трубного проката. Типы воздушно-плазменных резаков (плазмотронов), различных по своим техническим характеристикам, приведены в табл. 1. В качестве источника питания плазменной дуги применяли установку для плазменной резки "Полигон-250", в состав которой входят силовой специализированный выпрямитель, системы охлаждения плазмотрона и подготовки плазмообразующего газа. Весь комплекс оборудования размещен в контейнере. Для обеспечения высокого качества поверхности реза для перемещения резаков при различных скоростях резки применяли шарнирно-консольную машину ШКМ-1-1,5-1 "Огонек". Основные параметры режимов резки приведены в табл. 1, исследуемые образцы — на рис. 1. Во всех вариантах толщина разрезаемого металла 10 мм.

Поверхность реза металла исследовали на содержание кислорода, азота и водорода (рис. 2). Проводили также металлографические исследования поверхности реза. Содержание газов измеряли с помощью оборудования фирмы LECO. Анализ по водороду проводили на анализаторе RH-404 по методу измерения коэффициента теплопроводности, зависящего от содержания газа, выделившегося в процессе плавления образца. Содержание азота определяли подобным методом на анализаторе TC-600 с параллельным исследованием содержания кислорода с помощью датчика инфракрасного излучения. Массу образцов (0,5—1,0 г для водорода и 0,1—0,2 г для азота и кислорода) выбирали в процессе проведения калибровочных процедур с целью

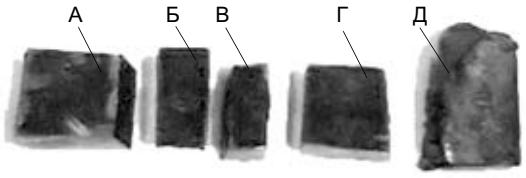


Рис. 1. Исследуемые образцы

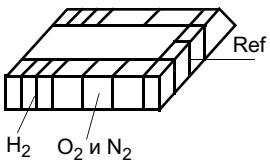


Рис. 2. Схема исследования поверхности реза металла на содержание остаточных газов (Ref — исходная матрица металла)

Таблица 1

Образец	*А*	*Б*	*В*	*Г*	*Д*
Способ резки	Плазмотрон ПРВ-М		Плазмотрон ПРВ	Плазмотрон ПМВР-М	Резак РЗР-62
Режим резки	$p_в$ = 0,1 МПа, $U_д$ = 140 В, $I_д$ = 260 А, $v_р$ = 1,4 м/мин	$p_в$ = 0,2 МПа, $U_д$ = 190 В, $I_д$ = 220 А, $v_р$ = 1,4 м/мин	$p_в$ = 0,2 МПа, $U_д$ = 180 В, $I_д$ = 250 А, $v_р$ = 1,4 м/мин	$p_в$ = 0,2 МПа, $U_д$ = 180 В, $I_д$ = 250 А, $v_р$ = 1,4 м/мин	$Q_к$ = 6 м^3/ч, $Q_п$ = 0,4 м^3/ч
Обозначения: $p_в$ — давление сжатого воздуха; $U_д$ — напряжение дуги; $I_д$ — ток дуги; $v_р$ — скорость резки; $Q_к$ — расход кислорода; $Q_п$ — расход пропана.					

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 8

уменьшения влияния поверхностных эффектов, возникающих при малом соотношении объем/поверхность. Измерения проводили на сериях образцов с предварительной механической очисткой поверхности для удаления хрупкой окалины и посторонних загрязнений и химической обработкой в спиртосодержащем растворе. Относительная погрешность измерительных методик, определенная по калибровочным образцам, составила 8—10 % (0,1—0,3 ppm) по водороду и 15—25 % (0,5—2,0 ppm) по кислороду и азоту. Исходное содержание газов в образцах составило 21 ± 3 ppm (N_2), 63 ± 12 ppm (O_2), 1,5 ± 0,2 ppm (H_2).

Способ воздушно-плазменной резки металлов характеризуется активным взаимодействием поверхности реза с потоками низкотемпературной слабоионизированной плазмы, а также с окружающей средой при последующем охлаждении ЗТВ теплового источника. При этом следует ожидать насыщения компонентами ПОГ (в первую очередь кислородом и азотом) шовной поверхности и приповерхностных слоев с образованием оксидов и нитридов металла. Распределение содержания азота в исследуемых образцах приведено на рис. 3.

Очевидно, что все исследуемые режимы резки характеризуются резким увеличением содержания азота в поверхностном слое реза. При резке ручным плазмотроном ПРВ-М в ЗТВ наблюдается увеличение его содержания в десятки раз (до 200—400 ppm) по сравнению с исходным (30 ppm), сопровождаемое большим разбросом значений (до 100— 150 ppm) в разных областях исследуемой поверхности. Резка ручным плазмотроном ПРВ характеризуется также стабильным превышением (на 100—150 ppm) содержания азота по вертикальной поверхности реза.

Содержание азота при резке механизированным плазмотроном ПМВР-М и газокислородной резке существенно ниже (60—70 ppm) и характеризуется равномерным распределением по поверхности реза.

Содержание кислорода вблизи поверхности реза (рис. 4) также превышает исходные значения по всем исследуемым образцам. При этом наименьшее его содержание (на 15—20 ppm больше исходного) при равномерном распределении по поверхности зафиксировано при резке плазмотроном ПРВ-М, а максимальное (до 450 ppm в средних и до 700—800 ppm в абсолютных величинах) с большим разбросом значений — при газокислородной резке. Содержание кислорода в остальных образцах в 3—5 раз превышает исходное (от 150 до 250 ppm) при меньшем разбросе по поверхности при резке плазмотроном ПМВР-М.

На рис. 5 приведены относительные значения насыщения кислородом и азотом (отношение среднего содержания O_2/N_2). Характерно, что для плазмотронов ПРВ и ВПР-М это отношение составляет 0,8—1,6, что значительно меньше равновесных значений в исходном материале (3,0—3,2). При газокислородной резке этот показатель составляет от 9 до 10. При резке плазмотроном ПМВР-М отношение среднего содержания O_2/N_2 остается на уровне, характерном для исходного металла.

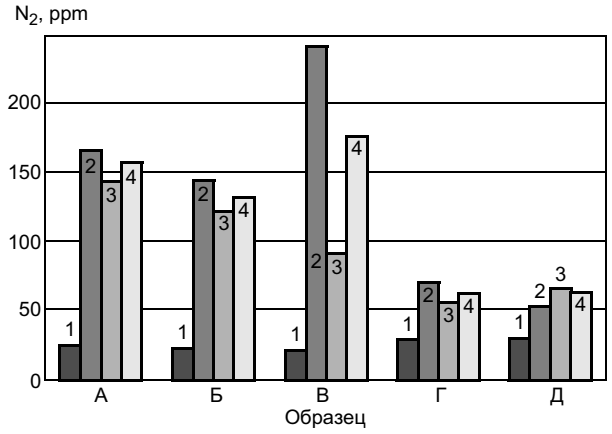


Рис. 3. Распределение содержания остаточного азота: *1* — исходное; *2—4* — среднее содержание на вертикальной, косой и на обеих поверхностях соответственно

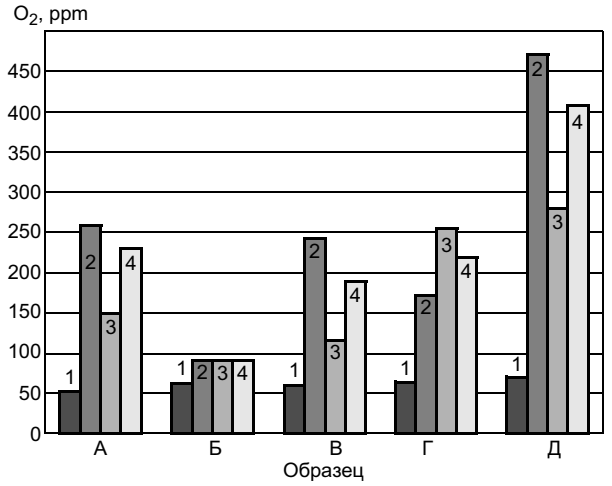


Рис. 4. Распределение содержания остаточного кислорода: *1—4* — см. рис. 3

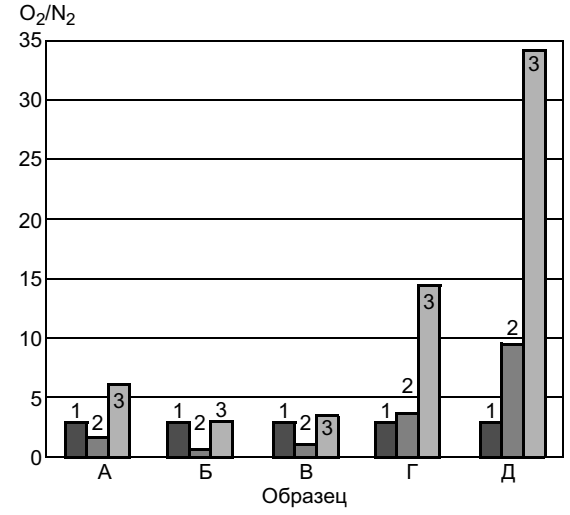


Рис. 5. Относительное содержание остаточных газов (кислород/азот): *1*, *2* — исходное и среднее содержание соответственно; *3* — удельное массовое значение

Интерпретируя приведенные на рис. 3—5 данные, следует учитывать особенности метода "горячей экстракции" газов, определяющего их среднее содержание в металле образца, тогда как процессы сорбции и диффузии газов затрагивают при резке лишь приповерхностные слои шва на глубине порядка 100 мкм. Следовательно, содержание в самом диффузионном слое может превышать измеренные значения. Так как резка металлов осуществляется в естественных условиях в воздушной среде, то процессы сорбции газов закономерно преобладают над процессами дегазации. Сам процесс растворения газов носит сложный характер, проходя через стадии сорбции в расплаве, высокотемпературной поверхностной хемосорбции и неизотермической диффузии в ЗТВ. Конструктивные особенности аппаратов для резки металла влияют на форму, температуру, скорость истечения и степень ионизации газоплазменной дуги, а режим резки — на характер взаимодействия газоплазменного потока с поверхностью и распределение температуры в зоне резки. Несмотря на сложности количественного моделирования перечисленных явлений, полученные экспериментальные данные позволяют сделать качественный сравнительный анализ представленных технологий.

Все рассмотренные процессы сопровождаются образованием газонасыщенного поверхностного слоя реза, что в свою очередь сказывается на его коррозионных и механических свойствах. При плазменной резке возможны также эффекты прямого ионного внедрения газоплазменных компонентов в приповерхностный слой, а также защитного действия нитридсодержащей пленки на поверхности реза по отношению к кислородопроницаемости в процессе остывания поверхности. В технологии газокислородной резки существенную роль играют процессы окисления поверхности в моменты ее остывания после удаления источника нагрева из зоны резки; при этом более низкая температура и скорость охлаждения в ЗТВ влияют на кинетику как поверхностных, так и диффузионных процессов кислород-азотного насыщения. Воздушно-плазменная резка также может сопровождаться изменением химического состава газовоздушной атмосферы, влияющего на характер протекания рассматриваемых явлений.

В ходе эксперимента была проанализирована растворимость водорода в стали в процессе ее резки, так как повышенное водородосодержание негативно влияет как на механические свойства (эффект охрупчивания), так и на тепловые и электрические характеристики стали. Несмотря на высокую водородопроницаемость стали даже при обычных температурах, низкому содержанию водорода в окружающей атмосфере соответствует низкое содержание водорода в стали (1—2 ppm) (рис. 6). Существенного наводороживания поверхностного слоя в процессах

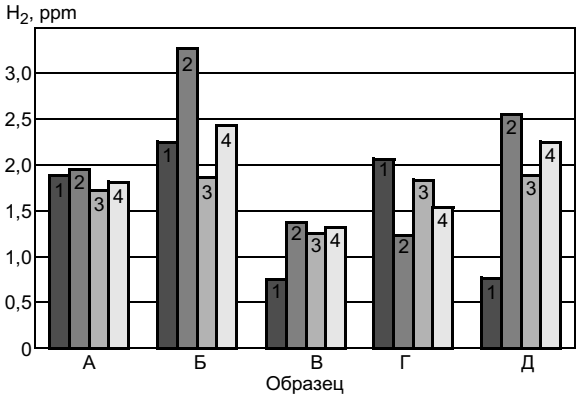
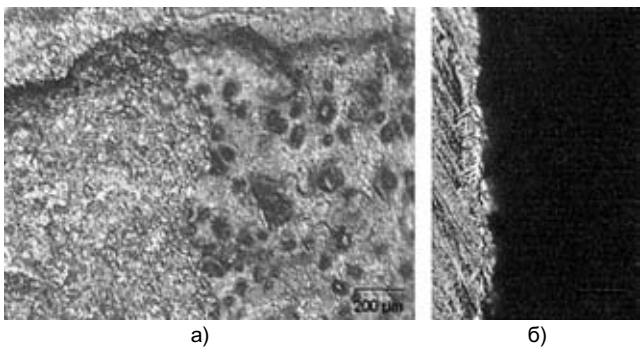


Рис. 6. Распределение содержания остаточного водорода: *1—4* — см. рис. 3

плазменной резки стали не наблюдается (максимальное содержание в пределах 3,5—4,0 ppm). Анализ образцов после газокислородной резки показывает увеличение содержания водорода в 2—3 раза по сравнению с его исходным содержанием вследствие наличия углеводородных компонентов в газокислородной струе.

Технологические особенности резки влияют на структуру и механические свойства поверхности металла в полости реза. Визуальный контроль качества разделочного шва свидетельствует о неоспоримых преимуществах плазменного метода по сравнению с газовым, где наблюдается грубая, неровная поверхность (см. рис. 1). Металлографический анализ поверхностей образцов после воздушно-плазменной резки, выполненный с помощью микроскопа OLYMPUS MY40 (визуальный анализ нетравленой поверхности в поляризованном свете), выявил образовавшиеся области хрупкой окалины, а также большое количество газовых пор (диаметром до 50—70 мкм) (рис. 7, *а*) со средней шероховатостью *Ra* = 2,0÷2,5 мкм (рис. 7, *б*) и ярко выраженной волнистостью поверхности (100 мкм с шагом 500 мкм), что соответствует классу точности 1—2 по нормам шероховатости (ГОСТ 14792—80).



а) б)

Рис. 7. Микроструктура поверхности реза при резке плазмотроном ПМВР-М (образец *Г*): *а* — × 100; *б* — × 1250

Структуре поверхности остальных образцов (рис. 8) также свойственна неоднородность с образованием областей с высокой пористостью, волнистостью и наличием высокодисперсных зон, возникающих в процессе термодиффузионной релаксации. Микроструктурный анализ приповерхностных слоев (травление в растворе бисульфита калия) свидетельствует также об отсутствии механизма накопления деформаций по глубине (см. рис. 8, образец *В*) при плазменной резке, а также о формировании полигональной многофазной субструктуры с большим количеством разориентированных границ при газовой резке (см. рис. 8, образец *Д*). По сравнению с исходной матрицей (рис. 9), имеющей мелкозернистую

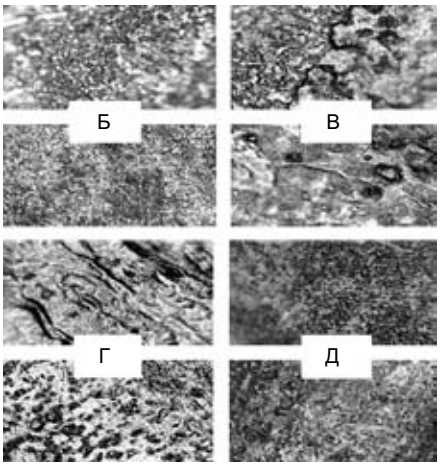


Рис. 8. Микроструктура (× 100) поверхности реза при плазменной (образцы *Б*—*Г*) и газовой (образец *Д*) резке без травления

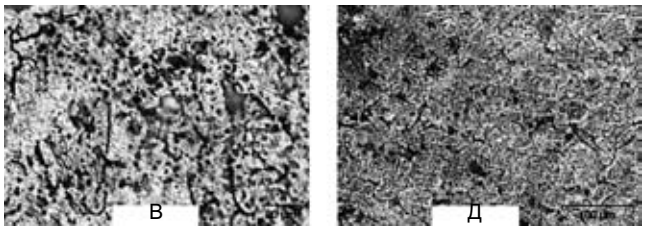


Рис. 9. Микроструктура поверхности реза при плазменной (образец *В*. × 500) и газовой (образец *Д*. × 200) резке с травлением

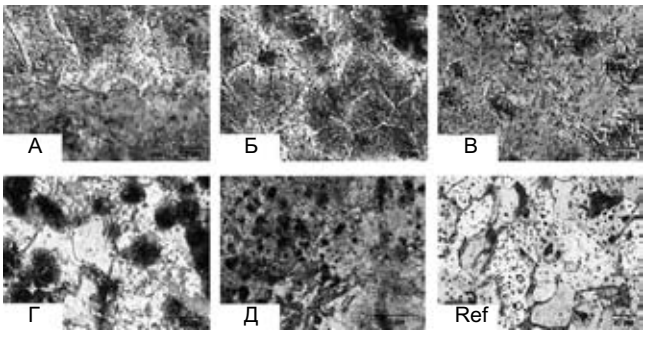


Рис. 10. Микроструктура металла ЗТВ при плазменной (образцы *А*—*Г*. × 800), газовой (образец *Д*. × 1500) резке и исходной матрицы металла (Ref. × 800)

Таблица 2

Слой поверхности реза	Микротвердость образца, HV (максимальное значение)				
	А	*Б*	*В*	*Г*	*Д*
Обработанный	153	163	119	146	140
Необработанный	105	95	95	110	110

(балл 7—8 со средним размером зерна 20—30 мкм) перлитно-ферритную структуру и большое количество интерметаллидных включений, структура металла в ЗТВ имеет существенные отличия.

Газокислородная резка сопровождается формированием мелкодисперсного многофазного приповерхностного слоя с высокой степенью пористости не только на поверхности, но и по глубине (см. рис. 9, образец *Д*). В процессе воздушно-плазменной резки (рис. 10, образцы *А*—*Г*) ЗТВ сохраняет зернистую структуру (рост зерна не наблюдается), претерпевая мартенситные превращения с растворением интерметаллических фаз (рис. 10, образцы *А*, *Б* при резке плазмотроном ПВР-М) либо их выделением (наряду с карбидами и троститом) по границам зерен и в областях межзеренных (в сопоставимых с размером зерна размерах) включений (см. рис. 10, образцы *В*, *Г*).

Все исследованные образцы имеют повышенную (по сравнению с матрицей исходного металла) микротвердость приповерхностных слоев реза (табл. 2), обусловленную закалкой. При этом наименьшие значения (119 HV) достигнуты при резке базовым ручным плазмотроном ПРВ в обработанном слое, характеризуемом высокой степенью разупорядоченности зерен и большим количеством объемных и точечных дефектов. Наиболее упорядоченная структура слоя наблюдается при резке модернизированным ручным плазмотроном ПРВ-М при максимальных значениях поверхностной микротвердости (163 HV). Средние параметры микротвердости (110—140 HV) при резке этим плазмотроном соответствуют средним параметрам образцов, полученных газокислородной резкой и резкой плазмотроном ПМВР-М.

ВЫВОДЫ

1. Технологиям газовой и плазменной резки низкоуглеродистых сталей присуще повышенное газосодержание в околошовной зоне. Выявлено преобладание нитридсодержащих компонентов при ручной плазменной резке, не приводящее к существенному увеличению микротвердости поверхности. При газовой резке преобладают оксидсодержащие компоненты, влияющие на хрупкость окалины.

2. Структура поверхности и ЗТВ характеризуется меньшей степенью пористости и большей равномерностью поверхности реза при плазменной резке в сравнении с газокислородной при соответствии качества резки первому и второму классам точности по ГОСТ 14792—80.

В. С. ИВАНОВ, канд. техн. наук, Г. Н. ВАСИЛЬЕВ, д-р техн. наук,
Н. Н. ЗУБКОВ, д-р техн. наук, Д. В. ИВАНОВ, студент
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Моделирование процесса формообразования при получении щелевых структур вращающимся лезвийным инструментом

Фрезерование применяют для обработки поверхностей вращения с целью получения щелевых поверхностей (рис. 1), используемых, например, для производства фильтрующих труб.

На сегодняшний день отсутствует аналитический метод оценки параметров формообразования применительно к многолезвийной циклоидальной обработке, который совместно учитывал бы такие особенности процесса, как взаимонаправленность движений, многолезвийность и цикличность. Под цикличностью понимают свойство процесса, сочетающее кратковременность участия каждого резца в формообразовании и повторяемость процесса резания через равные промежутки времени.

Цель данной работы — разработка математической модели процесса циклоидального формообразования щелевых структур при обработке трубчатых заготовок многолезвийным инструментом.

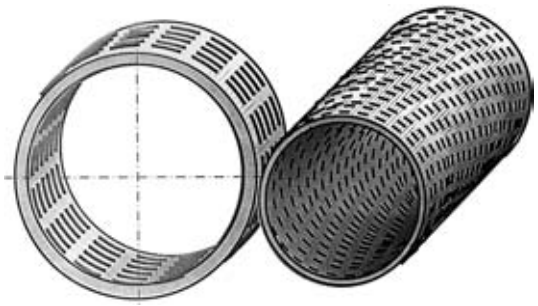


Рис. 1. Щелевые структуры, получаемые фрезерованием трубчатых заготовок в процессе циклоидального формообразования

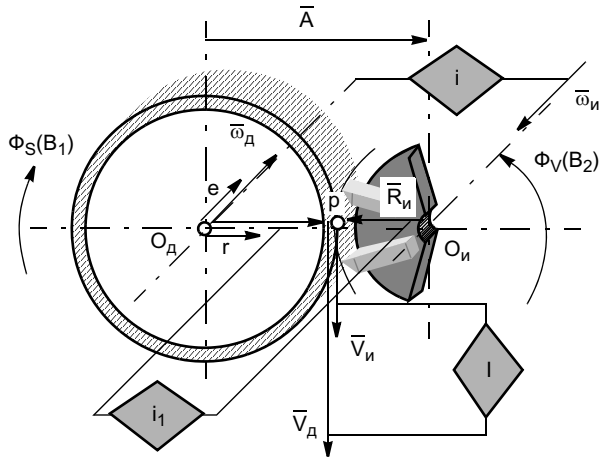


Рис. 2. Векторная модель схемы многолезвийной обработки

Моделирование схем технологического зацепления и методов обработки по передаточным отношениям

С целью математического описания законов формообразования для различных схем циклоидальной обработки формализуем компоновку технологической пары деталь — инструмент и вращательные движения в виде системы векторов, используя методы векторной алгебры [1, 2].

Рассмотрим абсолютное движение формообразующей точки (вершины резца) в координатах, связанных с деталью. Для этого зададим полярную систему координат, связанную с центром $O_д$ детали (рис. 2). Выбор полярной системы основан на специфике обрабатываемых поверхностей, имеющих круглый профиль, и движений детали и инструмента, описываемых также в полярной системе координат.

Положительное направление координатной оси зададим единичным вектором r, направленным из центра $O_д$ в полюс зацепления p. В соответствии с принятыми обозначениями схему зацепления детали и инструмента можно представить системой векторов: $\bar{A}$ — вектор расположения центра инструмента $O_и$ относительно начала координат $O_д$, направленный из $O_д$ в $O_и$ и численно равный межцентровому расстоянию A, $\bar{R}_д$ — вектор расположения полюса зацепления p относительно $O_д$, направленный из $O_д$ в p и численно равный номинальному радиусу детали, $\bar{R}_и$ — вектор расположения полюса p относительно $O_и$.

Векторы компоновки можно представить через единичный вектор r:

$$\bar{A} = Ar,\ \bar{R}_д = R_д r,\ \bar{R}_и = R_и r, \qquad (1)$$

где A, $R_д$, $R_и$ — координаты (алгебраические проекции на координатную ось) соответствующих векторов.

Система векторов A, $\bar{R}_д$, $\bar{R}_и$ является замкнутой и удовлетворяет соотношению

$$\bar{A} + \bar{R}_и = \bar{R}_д . \qquad (2)$$

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 8

Так как векторы коллинеарны, т. е. расположены на одной прямой, то для их координат выполняется условие

$$A + R_и = R_д. \quad (3)$$

Из соотношения (3) видно, что независимыми являются две из трех величин, а третья — их линейная комбинация.

Для анализа технологических схем удобнее рассматривать их характеристики в приведенном виде. Для этого параметры соотношения (3) приводим к радиусу детали. Их можно записать в следующем виде:

$$\tilde{R}_д = R_д/R_д = 1;\ \tilde{A} = A/R_д,\ \tilde{R}_и = R_и/R_д. \quad (4)$$

С учетом принятых обозначений выражение (3) имеет вид

$$\tilde{A} + \tilde{R}_и = 1. \quad (5)$$

Для технологических схем с циклоидальным формообразованием детали за независимые координаты можно принять $\tilde{R}_д = 1$ и $\tilde{R}_и$, величина которого полностью определяет соотношение радиусов инструмента и детали, а направление — схему технологического зацепления. Таким образом, характеристикой технологической компоновки, полностью определяющей схему зацепления, является вектор $\tilde{R}_и$ (приведенная координата инструмента).

С другой стороны, соотношение координат $R_и/R_д$ можно рассматривать как геометрическое передаточное отношение технологического зацепления i_1, тождественно равное приведенному радиусу инструмента:

$$i_1 \equiv \tilde{R}_и = R_и/R_д. \quad (6)$$

С учетом выражения (6) зависимость (5) можно записать в виде

$$\tilde{A} = 1 - i_1. \quad (7)$$

Кинематическими факторами формообразования для схем циклоидальной обработки являются вращательные движения $\Phi_s(B_1)$ и $\Phi_v(B_2)$, сообщаемые шпинделям (см. рис. 2). Характеристиками движений являются векторы угловых скоростей $\bar{\omega}_д$ и $\bar{\omega}_и$. При параллельном расположении шпинделей векторы $\bar{\omega}_д$ и $\bar{\omega}_и$ коллинеарны, т. е расположены вдоль параллельных осей. Расстояние между линиями действия векторов равно A.

Задавая координатную ось угловых скоростей с единичным вектором e, можно записать

$$\bar{\omega}_д = e\omega_д;\ \bar{\omega}_и = e\omega_и, \quad (8)$$

где $\omega_д$, $\omega_и$ — координаты соответствующих векторов на оси ω или кинематические координаты.

Соотношение вращений $\Phi_v(B_1)$ и $\Phi_s(B_2)$ шпинделей детали и инструмента можно представить кинематическим передаточным отношением координат $\omega_д$ и $\omega_и$:

$$i = \omega_д/\omega_и. \quad (9)$$

Совокупность геометрического и кинематического передаточных отношений характеризует как схему технологического зацепления, так и соотношение по величине и направлению окружных (линейных) скоростей сопрягаемых профилей детали и инструмента в полюсе p технологического зацепления, т. е. полностью характеризует способ обработки.

Комбинация передаточных отношений i_1 и i характеризует передаточное отношение окружных (линейных) скоростей инструмента и детали I:

$$I = \frac{v_и}{v_д} = \frac{i_1}{i}. \quad (10)$$

Кинематическая модель циклоидального формообразования деталей при лезвийной обработке

Одним из интегральных выходных параметров процесса получения щелевых структур, определяющих форму щели, является траектория формообразования, представляющая геометрическое место точек, последовательно занимаемых фиксированной на инструменте точкой, например вершиной резца, в координатах, связанных с деталью, например с ее центром.

Для математического описания траектории использовали принцип относительности движений, согласно которому деталь и связанную с ней систему координат фиксируют от вращения, а инструменту с центром $O_и$ сообщают обращенное вращательное движение $-\Phi_v(B_1)$ вокруг центра детали $O_д$ с угловой скоростью $-\omega_д$, равной по величине и противоположной по направлению угловой скорости $\omega_д$ реального вращения детали (рис. 3). Враща-

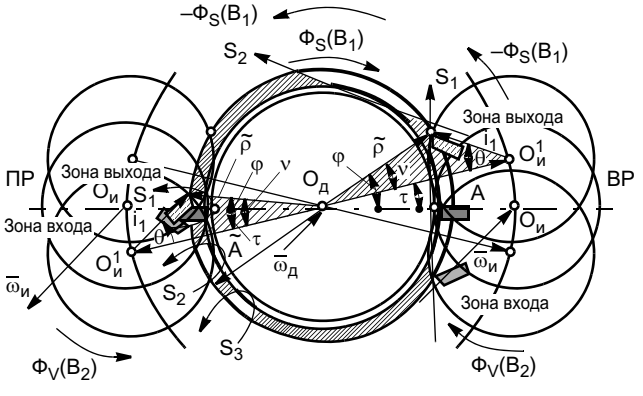


Рис. 3. Векторная модель процесса циклоидального формообразования (*ПР* — попутное резание; *ВР* — встречное резание; S_1—S_3 — траектории формообразования)

тельное обращенное движение $-\Phi_s(B_1)$ центра инструмента $O_и$ относительно центра детали $O_д$ является переносным, а вращательное движение инструмента вокруг собственного подвижного центра $O_и$ — относительным.

Рассмотрим абсолютное движение формообразующей точки (вершины резца) в координатах, связанных с центром детали, в приведенном виде. В качестве геометрических показателей схемы зацепления, угловых координат и скоростей используют принятые ранее соотношения (6), (7), (9).

Приведенный радиус формообразования $\tilde{\rho}$ определяется отношением текущего радиуса формообразования ρ к номинальному радиусу детали $R_д$:

$$\tilde{\rho} = \rho/R_д. \qquad (11)$$

Обозначим угловое отклонение инструментального шпинделя $O_и^1$ в обращенном движении от нулевого положения по истечении некоторого времени t через τ. За это время точка зацепления детали и инструмента переместится из полюса p в новое положение p^1, при этом радиус-вектор i_1 этой точки повернется вокруг центра $O_и$ на угол θ относительно нулевого положения. При этом справедливы соотношения

$$\tau = -\omega_д t;\ \theta = \omega_и t. \qquad (12)$$

Радиус-вектор формообразования $\tilde{\rho}$, направленный из центра $O_д$ в точку зацепления p^1, в векторном виде

$$\tilde{\rho} = \tilde{A} + i_1. \qquad (13)$$

Модуль (абсолютная величина) приведенного радиуса-вектора формообразования $\tilde{\rho}$ определяется из векторного треугольника $\tilde{A}\, i_1 \tilde{\rho}$ (см. рис. 3):

$$\tilde{\rho} = \sqrt{\tilde{A}^2 + i_1^2 - \tilde{A} i_1 \cos\theta}\,. \qquad (14)$$

Подставляя значение $\tilde{A}$ из формулы (7), после преобразования получим

$$\tilde{\rho} = \sqrt{1 - 4(1 - i_1) i_1 \sin^2(\theta/2)}\,, \qquad (15)$$

где i_1 — геометрическое передаточное отношение схемы технологического зацепления; θ — текущий угол отклонения радиуса-вектора формообразующей точки инструмента (вершина резца) от нулевого положения (полюс зацепления p).

Угловое положение радиуса-вектора формообразования φ в абсолютных координатах, связанных с деталью, определяется углом его отклонения от начального положения. Угол φ определяется угловым отклонением τ центра $O_и^1$ в обращенном движении и угловым отклонением ν радиуса-вектора формообразования $\tilde{\rho}$ относительно начального положения (линии центров) в подвижной системе координат:

$$\varphi = \tau + \nu. \qquad (16)$$

Угол ν определяем из векторного треугольника $\tilde{A}\, i_1 \tilde{\rho}$:

$$\tilde{\rho} \sin\nu = i_1 \sin\theta. \qquad (17)$$

Поскольку за положительное направление принято направление абсолютного вращения детали ($\omega_д > 0$), то угловое отклонение в обращенном движении ($\tau = -\omega_д t$) отрицательно, а знаки угловых отклонений ν и θ определятся в сравнении с направлением угла τ. В случае их однонаправленности они отрицательны, в случае разнонаправленности — положительны.

Взаимосвязь угловых отклонений τ и θ определяется соотношением

$$\tau/\theta = -\omega_д t/\omega_и t = -i \text{ или } \tau = -i\theta. \qquad (18)$$

Выражения (15)—(18) определяют кинематическую модель циклоидального формообразования деталей при лезвийной обработке по одной траектории, которую можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \tilde{\rho} = \sqrt{1 - 4(1 - i_1) i_1 \sin^2(\theta/2)}\,; \\ \tilde{\rho} \sin\nu = i_1 \sin\theta; \\ \varphi = \tau + \nu; \\ \tau = -i\theta. \end{cases} \qquad (19)$$

Модель (19) однозначно определяет взаимосвязь параметров $\tilde{\rho}$, φ траектории формообразования S с геометрическими параметрами схемы зацепления i_1 и кинематическими параметрами процесса (i, θ, τ, ν). Модель содержит семь переменных, функционально связанных четырьмя уравнениями. Решение модели заключается в определении четырех переменных при заданных трех.

Выражая $\theta_{вх}$ в радианах и используя формулы приближений [2] для углов θ и ν до 20° ($\pi/9$) рад. с погрешностью до 3 %, можно записать

$$\begin{cases} \tilde{\rho} = 1 - \dfrac{1}{2}(1 - i_1) i_1 \theta^2; \\ \tilde{\rho}\, \nu = i_1 \theta; \\ \varphi = \tau + \nu; \\ \tau = -i\theta, \end{cases} \qquad (20)$$

где углы θ, τ, ν, φ выражены в радианах.

Из системы уравнений (20) можно в явном виде получить текущее значение приведенного радиуса формообразования $\tilde{\rho}$ в безразмерном виде.

Абсолютное значение текущего радиуса формообразования

$$\rho = \tilde{\rho} R_д. \quad (21)$$

Поскольку согласно уравнению модели (20)

$$\nu = i_1 \frac{\theta}{\tilde{\rho}} \approx i_1 \theta, \quad (22)$$

то из третьего и четвертого уравнений системы (20) получим

$$\varphi = -i\theta + i_1\theta. \quad (23)$$

Тогда угол θ контакта инструмента с деталью

$$\theta = \frac{\varphi}{i_1 - i}. \quad (24)$$

Подставляя значение θ из уравнения (24) в первое уравнение модели (20), получим математическую модель, функционально взаимосвязывающую геометрические параметры щели (центральный угол φ) и схемы технологического зацепления, а также кинематические параметры формообразующих движений:

$$\tilde{\rho} = 1 - \frac{1}{2}(1 - i_1) i_1 \left(\frac{\varphi}{i_1 - i} \right)^2 =$$

$$= 1 - \frac{1}{2}(i_1^{-1} - 1) \left(\frac{\varphi}{1 - I^{-1}} \right)^2. \quad (25)$$

Уравнение (25) позволяет рассчитать длину прорезаемой щели при заданной схеме технологического зацепления и кинематических параметрах обработки, а также определить параметры схемы обработки для требуемой длины щели.

Например, для определения длины щели l при заданных $R_{д1}$, A, $R_и$ ($R_{д1}$ — радиус внутренней поверхности трубчатой заготовки, по которой определяется длина щели, $\omega_д$, $\omega_и$) алгоритм расчета включает следующие процедуры.

1. Определить геометрическое передаточное отношение схемы технологического зацепления:

$$i_1 = \frac{R_и}{R_д} = \frac{R_и}{A + R_и},$$

где $R_д$, $R_и$, A — координаты соответствующих векторов в принятой системе координат, связанной с центром детали; $R_д$ — начальный (настроечный) радиус детали, соответствующий расстоянию от центра детали $O_д$ до вершины инструмента при его расположении на линии центров $O_д O_и$ и равный $A + R_и$.

2. Определить кинематическое передаточное отношение угловых скоростей детали и инструмента по формуле (9).

3. Приравнять текущий радиус формообразования радиусу внутренней поверхности трубчатой заготовки:

$$\rho = R_{д1}.$$

4. Определить центральный угол φ формообразования щели исходя из формул (21) и (25):

$$\varphi = \left| (i_1 - i) \sqrt{\frac{1 - \frac{\rho}{A + R_и}}{\frac{1}{2}(1 - i_1) i_1}} \right|.$$

5. Определить длину прорезаемой щели

$$l = 2R_{д1}\varphi.$$

Для исходных данных ($R_{д1}$ = 22 мм, $R_и$ = 95 мм, A = 116,5 мм, $\omega_д = 2\pi \cdot 500$ рад/мин, $\omega_и = -2\pi \cdot 500$ рад/мин при попутном резании и $\omega_и = 2\pi \cdot 500$ рад/мин при встречном резании) длина щели для попутного резания l_1 = 6,644 мм и для встречного резания l_2 = 10,515 мм.

На основе выполненных расчетов установлено, что для одних и тех же исходных данных щель, полученная попутным резанием, короче щели, полученной встречным резанием.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный принципиально новый метод анализа циклоидальных процессов формообразования деталей при лезвийной обработке базируется на векторной модели технологического зацепления и формообразующих движений. Передаточные отношения характеризуют как схему технологического зацепления, так и соотношение угловых и линейных скоростей, т. е. определяют способ обработки.

2. Разработанная кинематическая модель циклоидального формообразования деталей при лезвийной обработке позволяет рассчитывать геометрические параметры щелевых структур при заданной схеме технологического зацепления и кинематических параметрах обработки, а также определять параметры схемы обработки для требуемой длины щели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бугров Я. С., Никольский С. М.* Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии. М.: Наука, 1980. 176 с.
2. *Корн Г., Корн К.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.

Д. А. ОСЬКИН, аспирант, В. Б. МАСЯГИН, канд. техн. наук
Омский государственный технический университет

Совершенствование расчета технологических размеров на основе выявления обратных связей между допусками и условиями обработки

Введение. Расчет технологических допусков необходим при расчете технологических размеров на этапе проектирования технологии механической обработки. От качественного расчета технологических допусков зависят затраты на настройку станков, выверку заготовки или изготовление приспособлений соответствующей точности, на переточку инструментов, а также расход металла, трудоемкость и качество обработки. В то же время многие технологические факторы, такие как упругие и тепловые деформации технологической системы, износ инструмента, рассчитывают на основе режимов обработки, связанных с величиной удаляемого припуска.

Припуск определяется минимальной величиной и величиной колебания, равной сумме технологических допусков соответствующей технологической размерной цепи. Таким образом, налицо существование обратной связи: технологический допуск — величина припуска — технологические факторы — технологический допуск.

В настоящее время исследованы отдельные закономерности в этой цепочке связей, но в целом проблема решена лишь приблизительно. Задачами проводимых исследований являются создание нового метода расчета оптимальных допусков на основе теоретических моделей, разработка программного обеспечения, экспериментальная и практическая проверка. Для решения поставленных задач использовали основные положения технологии машиностроения о погрешностях обработки и припусках, методы автоматизированного расчета технологических размерных цепей и линейного программирования. В этом случае технологические допуски назначают с более полным учетом условий изготовления на каждой операции, что приводит к снижению затрат при изготовлении деталей. Возросшая трудоемкость расчета компенсируется применением соответствующих баз данных и программного обеспечения, работающего в режиме диалога с пользователем.

Методика проведения исследований. При проектировании технологических процессов механической обработки возникает задача назначения допусков на размеры, указываемые на операционных картах [1]. Эти допуски должны удовлетворять двум условиям:

— обеспечить допуски замыкающих звеньев технологических размерных цепей размеров чертежа, припусков;

— обеспечить минимальную себестоимость обработки.

Для обеспечения первого условия допуски обычно назначают за несколько попыток, и попыток тем больше, чем сложнее взаимосвязь размерных цепей. Природа отмеченной трудности заключается в том, что рассматриваемую задачу описывают системой неравенств в соответствии с методикой Б. С. Мордвинова [2].

В общем виде эта система неравенств может быть представлена следующим образом:

$$\sum_{A_i \in \mu S_1} \delta A_i \leqslant \delta S_1;\ \delta A_1 \geqslant \rho A_1;$$

$$\sum_{A_i \in \mu S_2} \delta A_i \leqslant \delta S_2;\ \delta A_2 \geqslant \rho A_2;$$

... ...

$$\sum_{A_i \in \mu S_n} \delta A_i \leqslant \delta S_n;\ \delta A_n \geqslant \rho A_n,$$

где δA_i, δS_i — соответственно допуски технологических (A_i) и конструкторских (S_i) размеров; ρA_i — погрешности размеров A_i, определяемые точностью методов обработки; $A_i \in \mu S_i$ — технологические размеры A_i, образующие размерную цепь конструкторского размера S_i (A_i входит в путь S_i).

Величина допусков определяется, прежде всего, методом изготовления заготовки и механической обработки. Допуски на размеры механической обработки определяются по таблицам средней (экономической) точности методов обработки, однако их нельзя считать окончательными. Необходимо дополнительно проанализировать все операции технологического процесса и выявить погрешности, которые не могут быть учтены в соответствующих нормативных таблицах (так называемые доминирующие погрешности). Наличие или отсутствие погрешностей целиком определяется конкретными условиями обработки, их выявление требует творческого подхода и знания основ технологии машиностроения, поэтому не может быть регламентировано.

Простейший метод назначения допусков на технологические размеры — их распределение в графе размерных цепей. Очевидно, что допуски, назначенные таким образом, не являются оптимальными. Описанная система неравенств допускает множество решений, но только одно может обеспечить ми-

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 8

нимальную стоимость обработки (второе условие, которому должны удовлетворять допуски на технологические размеры).

Оптимальные допуски можно получить при решении системы неравенств методами линейного программирования. Такое утверждение основано на том, что поставленная задача по своей математической формулировке полностью совпадает с формулировкой задач линейного программирования (рис. 1). Из всех имеющихся методов линейного программирования наиболее приемлемым следует считать симплекс-метод. Его можно охарактеризовать следующим образом: это есть метод решения системы неравенств для получения наилучшего решения при наличии многих ограничений.

Целевая функция зависит от конкретной задачи и должна выражать цель решения (например снижение издержек производства.). Цель данной задачи — обеспечить минимальную себестоимость или, что то же самое, максимальную экономию (в линейном программировании принят термин "максимальная прибыль"). Симплекс-метод позволяет максимизировать целевую функцию, поэтому необходимо выбрать второй вариант (максимум прибыли). В этом случае целевая функция примет вид

$$C_1X_1 + C_2X_2 + ... + C_nX_n = \max,$$

где X_i — переменные, соответствующие допустимому изменению допусков; C_i — постоянные коэффициенты, соответствующие "удельному весу" каждого допуска в формировании экономии.

Допустимое изменение допусков на каждой операции зависит от конкретной системы неравенств и вполне ими определено. "Удельный вес" допусков зависит от большого количества факторов, поэтому дать им определенные численные значения чрезвычайно трудно. Известно, что стоимость обработки в зависимости от величины допуска изменяется не линейно, а гиперболически, хотя в определенном диапазоне изменения допусков эту зависимость можно считать линейной. Но и это еще нельзя считать ответом на вопрос о численном значении коэффициентов. Для описания этого метода решения задачи можно условиться и величину коэффициентов задать самым простым способом: в пределах коэффициентов первых четырех разрядов тарифной сетки, поскольку они в какой-то мере отражают класс точности обработки (через сложность работы) и стоимость работы (через часовую ставку). Очевидно, что более точные допуски увеличивать выгоднее, поэтому им должен соответствовать более высокий коэффициент.

Методика Б. С. Мордвинова может быть усовершенствована, если ввести не только возможные увеличения допусков, но и их уменьшение, а также учесть влияние обратной связи между погрешностью припуска и возможным уменьшением допуска (см. рис. 1).

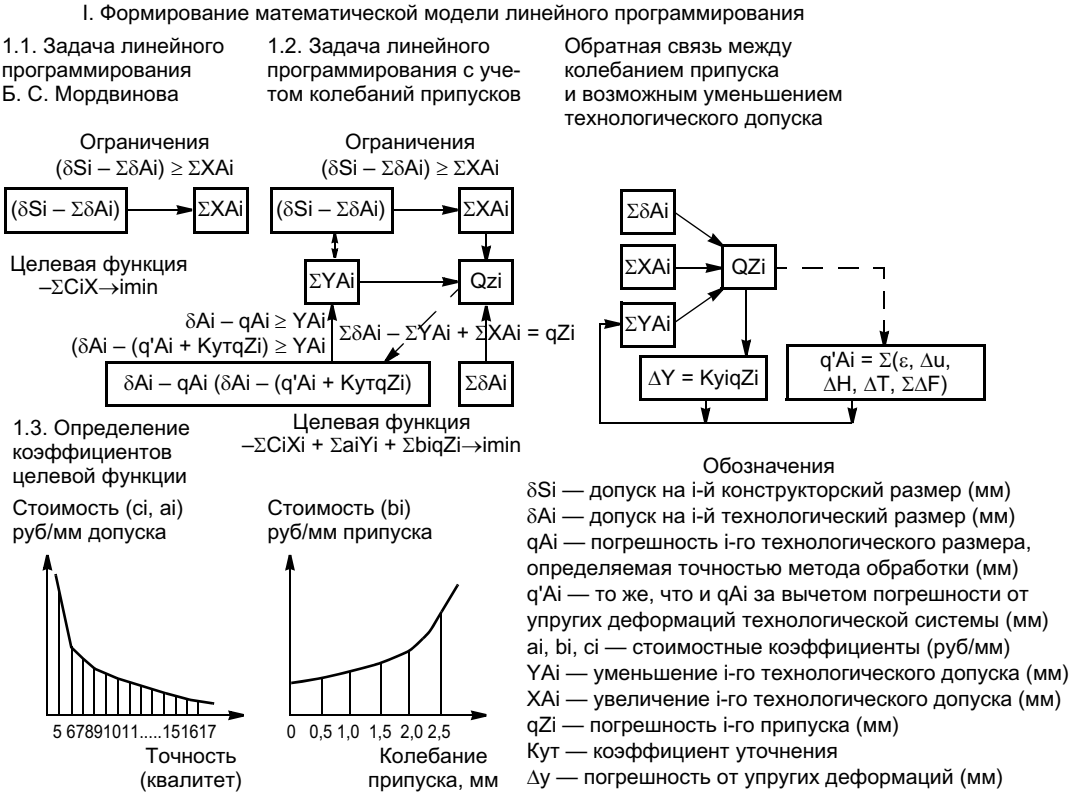


Рис. 1. Схема формирования математической модели программирования

Рис. 2. Методика оптимизации допусков и припусков с учетом обратной связи

На основе модели с учетом обратной связи разработана методика оптимизации допусков и припусков (рис. 2).

Методика включает в себя три основных раздела: исходные данные, промежуточные результаты и окончательные результаты.

К исходным данным относятся данные геометрической модели технологического процесса, данные о детали, наименование метода обработки, шероховатость готовой детали; данные справочников, нормативов и ГОСТов (база данных); результаты программы расчета линейных технологических размеров.

В ходе вычисления получаем следующие промежуточные данные.

При расчете допуска: квалитет точности на операцию, ориентировочную величину технологического размера, доминирующую погрешность.

При расчете припуска: параметр шероховатости на операциях, глубину дефектного слоя, обозначение технологических размеров и припусков.

Окончательные результаты включают допуски на все технологические размеры, припуски на всех операциях, сводную таблицу полученных результатов.

Разработка алгоритма и программы сопровождения баз данных заключается в следующем: основой алгоритма служит методика Б. С. Мордвинова, так как она проста и позволяет получить относительно точный результат. Структура алгоритма линейна, т. е. вычисления выполняют в строгой последовательности. Вначале вводят основную информацию первых столбцов: номера операций, коды обработки, количество размеров на переходе, общее число размеров (определяем размер массива). Также вводят ориентировочный размер и его код для дальнейшего определения требуемого размера. Вычисляют ориентировочный квалитет в соответствии с типом обработки (здесь подключается массив соответствия получаемого квалитета от метода обработки). На основе данных о квалитете вычисляют значения допусков (таблица значений допусков). Далее производят назначение *Rz* и *h* (таблица значений *Rz* и *h* в зависимости от метода обработки) и припусков суммированием значений *Rz* и *h* на предыдущих операциях соответствующих размеров.

В результате получаем массив значений следующих параметров: номер операции, код обработки, получаемый квалитет, ориентировочный размер, допуск на размер, параметр шероховатости, глубину дефектного слоя, припуск на размер.

Описание программы симплекс-метода. Модель линейного программирования характеризуется четырьмя предположениями.

1. *Пропорциональность*. В модели линейного программирования величины затраты и выпуска различных ингредиентов технологического процесса всегда пропорциональны его интенсивности.

2. *Неотрицательность*. Отрицательные интенсивности невозможны.

3. *Сохранение баланса*. Требуется, чтобы общее количество каждого ингредиента, определенное системой как целое, было равно сумме количеств, выходящих из нее.

4. *Линейная целевая функция*. Один из ингредиентов системы рассматривается как "ценностный" в том смысле, что общее его количество, произведенное системой, измеряет выигрыш системы. Вклад каждого технологического процесса в общий выигрыш есть количество ценностного ингредиента, который потребляется или выпускается в этом технологическом процессе. Таким образом, если цель состоит в том, чтобы максимизировать доход, технологические процессы, которые требуют денег, вносят в общий доход отрицательную величину, а те технологические процессы, которые производят деньги, вносят в общий доход положительную величину.

Разработанная программа [3] предназначена для расчета технологических размеров с оптимизацией допусков и использованием предварительно подготовленных исходных данных.

Рис. 3. Интерфейс программы для ЭВМ

На основе введенной информации о детали и технологическом процессе программа автоматически проверяет исходные данные, назначает допуски на технологические радиальные размеры и величины припусков, сообщает об ожидаемых погрешностях радиальных конструкторских размеров, а также осуществляет оптимизацию технологических допусков на основе трех видов моделей линейного программирования (на основе допусков, допусков и припусков и с обратной связью через погрешность припусков), выполняет расчет линейных технологических размеров и их корректировку.

При использовании программы становится возможным оперативный анализ варианта технологического процесса с назначением оптимальных допусков на межоперационные размеры.

Пример расчета линейных технологических размеров с оптимизацией допусков "OPTIMAL"

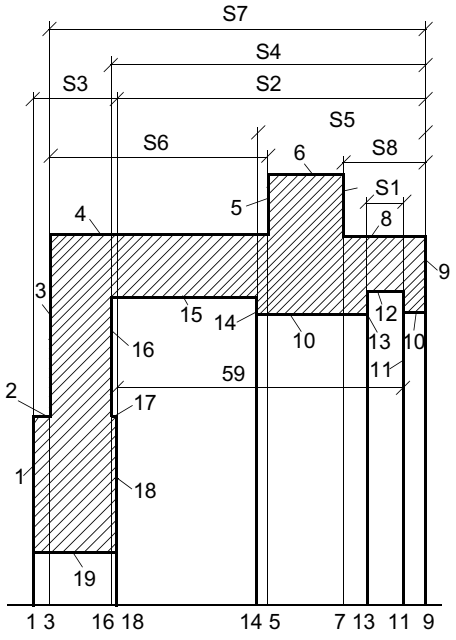


Рис. 4. Модель детали "Обойма" для расчета линейных размеров

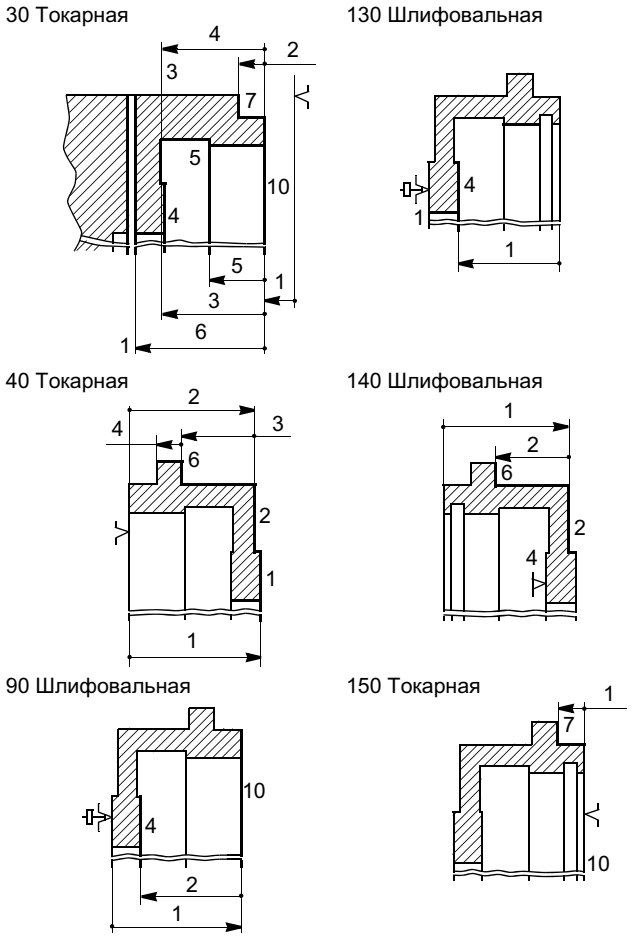


Рис. 5. Модель технологического процесса детали "Обойма"

План моделирования. 1. Описание файла исходных данных, содержащих параметры — коэффициенты целевой функции, ограничений и коэффициент уточнения.

Ряд *1*. –64 –32 –16 –10 –6 –4 –2,5 –2 –1,5 –1 –0,5 –0,3 –0,2 –0,1

Ряд *2*. 64 32 16 10 6 4 2 2 1 1 0,5 0,3 0,2 0,1

Индекс	Припуск до оптимизации, мм	Припуски, мм, после оптимизации по		
		допуску	допуску и припуску	допуску, припуску и с учетом обратной связи
30.100	$0{,}50000^{+0{,}620}$	$0{,}50000^{+0{,}620}$	$0{,}50000^{+1{,}240}$	$0{,}50000^{+0{,}520}$
40.100	$0{,}22000^{+0{,}230}$	$0{,}22000^{+0{,}240}$	$0{,}24000^{+0{,}390}$	$0{,}22100^{+0{,}300}$
40.400	$0{,}23000^{+0{,}510}$	$0{,}23000^{+0{,}510}$	$0{,}20500^{+0{,}525}$	$0{,}20450^{+0{,}436}$
90.100	$0{,}22000^{+0{,}100}$	$0{,}21500^{+0{,}130}$	$0{,}24000^{+0{,}065}$	$0{,}24900^{+0{,}060}$
90.200	$0{,}22000^{+0{,}308}$	$0{,}21500^{+0{,}338}$	$0{,}24000^{+0{,}481}$	$0{,}24900^{+0{,}476}$
130.100	$0{,}09200^{+0{,}080}$	$0{,}06700^{+0{,}108}$	$0{,}08400^{+0{,}160}$	$0{,}08400^{+0{,}160}$
140.100	$0{,}23000^{+0{,}350}$	$0{,}22500^{+0{,}430}$	$0{,}20500^{+0{,}275}$	$0{,}22750^{+0{,}243}$
140.200	$0{,}23000^{+0{,}558}$	$0{,}23000^{+0{,}780}$	$0{,}23000^{+0{,}466}$	$0{,}22500^{+0{,}412}$
150.100	$0{,}08000^{+0{,}448}$	$0{,}07500^{+0{,}700}$	$0{,}06000^{+0{,}346}$	$0{,}05900^{+0{,}234}$

Ряд *3*. 0,65 1 1 0,05, где ряд *1* — коэффициенты целевой функции при X_i для диапазона квалитетов точности от 4 до 14; ряд *2* — коэффициенты целевой функции при Y_i для диапазона квалитетов точности от 4 до 14; ряд *3*: 0,65 — доля технологического допуска, разрешенная к уменьшению (Y_i); 1 — коэффициент при Z_i в целевой функции; 1 — доля технологического допуска, разрешенная к увеличению (X_i); 0,05 — коэффициент уточнения ($K_{ут}$) в модели с учетом обратной связи.

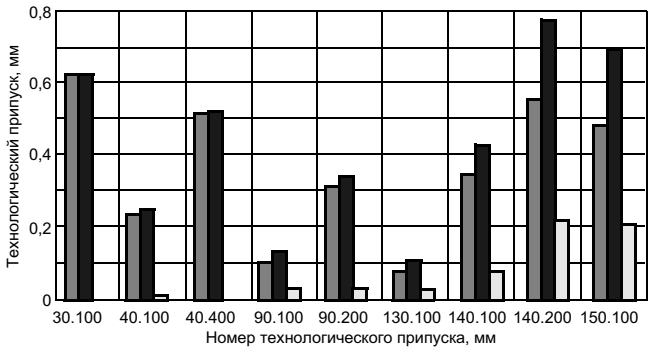


Рис. 6. Диаграмма сравнения технологических припусков до и после оптимизации по допуску (▩ — до оптимизации, ■ — после оптимизации; □ — увеличение или уменьшение)

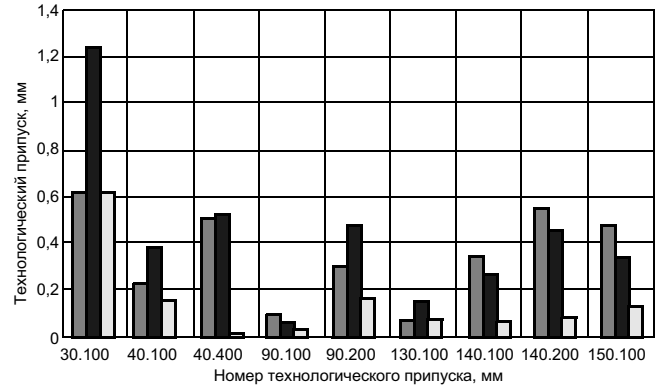


Рис. 7. Диаграмма сравнения технологических припусков до и после оптимизации по допуску и припуску (обозначения — см. рис. 6)

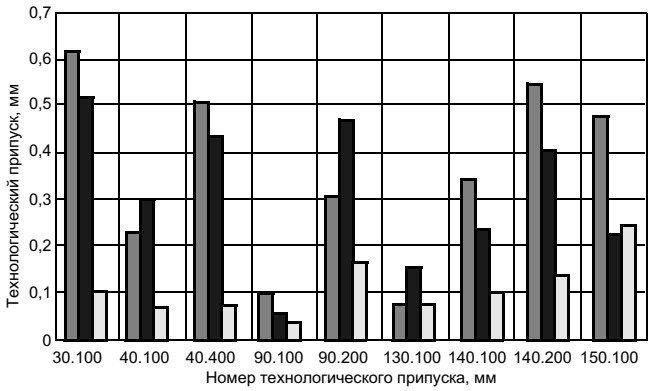


Рис. 8. Диаграмма сравнения технологических припусков до и после оптимизации по допуску, припуску и с учетом обратной связи (обозначения — см. рис. 6)

Рассмотрим четыре варианта расчета: без оптимизации и с оптимизацией по допуску, допуску и припуску, допуску и припуску с учетом обратной связи с одними и теми же исходными данными. Результаты приведены в виде таблицы и диаграмм (рис. 6—11).

Результаты моделирования. В таблице приведены величины рассчитанных припусков, а на диаграммах — величины припусков (рис. 6—8) и допусков (рис. 9—11).

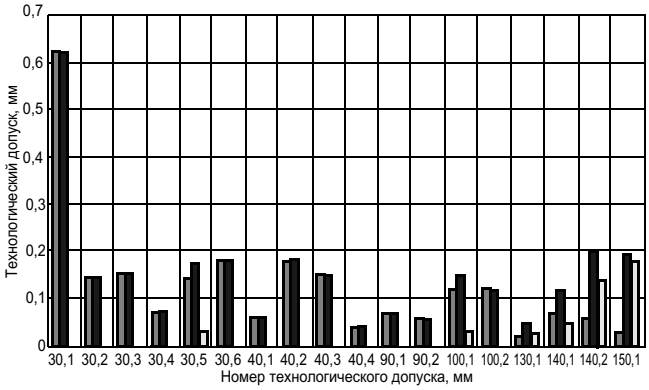


Рис. 9. Диаграмма сравнения технологических допусков до и после оптимизации (обозначения — см. рис. 6)

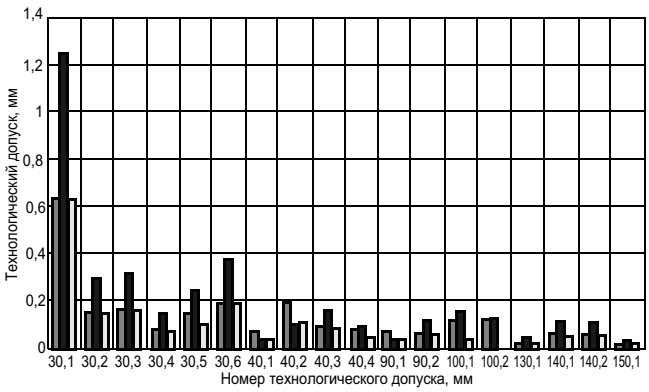


Рис. 10. Диаграмма сравнения технологических допусков до и после оптимизации по допуску и припуску (обозначения — см. рис. 6)

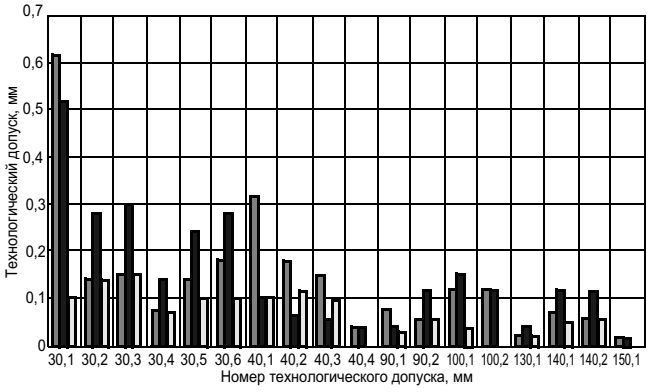


Рис. 11. Диаграмма сравнения технологических допусков до и после оптимизации по допуску, припуску и с учетом обратной связи (обозначения — см. рис. 6)

ВЫВОД

Представленный вид технологического проектирования, вытекающий из связи расчета технологических размеров и модели линейного программирования, отличается своей новизной и имеет комплексный характер. Главной особенностью данного метода является учет обратной связи между колебаниями припуска и допуска при расчете технологических размеров.

Список литературы

1. *Chang Ching-Liang, Wei Chiu-Chi, Chen Chie-Bein* Concurrent maximization of process tolerances using grey theory // Rob. and Comput. — Integr. Manuf: Artificial Intelligence and Advanced Computing Technologies for Space. 2000. Vol. 16. N 2, 3. С. 103—107.
2. *Мордвинов Б. С.* Оптимизация допусков на технологические размеры // Сборник трудов механико-технологического факультета. Омск: ОмПИ, 1972. С. 139—151.
3. *Расчет* линейных технологических размеров с оптимизацией допусков "OPTIMAL" / В. Б. Масягин, С. Г. Головченко, Р. Л. Артюх и др. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2006613684 от 24.10.2006.

А. В. ТАРНОПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук
Пензенский государственный университет

Вихревой способ подготовки и подачи СОТС в виде воздушно-жидкостного аэрозоля при обработке резанием

Смазывающе-охлаждающие технологические среды (СОТС) в виде газов, жидкостей или их сочетаний применяют при обработке материалов резанием. Наибольшее применение находят смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), которые производят охлаждающее, смазывающее, химическое, режущее и моющее действия. Ряд исследователей [1, 2] выявили, что наиболее важным свойством СОЖ является ее смазочно-химическое действие. Суть его заключается в том, что под действием высоких температур и давлений в зоне резания при наличии ювенильных поверхностей заготовки и стружки компоненты СОЖ разрушаются с образованием весьма реакционных частиц — атомов и радикалов, вступающих в химическую реакцию с поверхностями заготовки, стружки и режущего инструмента с образованием твердых смазочных пленок.

С технологической точки зрения подача СОТС представляет соответствующим образом организованный поток веществ. Подача СОТС может быть однофазной и многофазной [1, 2]. При однофазной подаче в зону обработки поступает какое-либо одно технологическое средство, например воздух или какой-либо газ, СОЖ в виде эмульсии на водной основе или масла. При многофазной подаче в зону резания подают одновременно несколько различных СОТС. В настоящее время чаще всего используют однофазную подачу, но многофазная подача более перспективна, так как позволяет значительно повысить эффективность обработки за счет сочетания свойств, присущих различным видам СОТС. При многофазной подаче СОТС появляется возможность совместно и в полной мере реализовать охлаждающее, смазывающее, химическое, режущее и моющее действия, характерные для различных типов СОТС.

Одним из эффективных способов повышения производительности процессов механической обработки и снижения затрат на применение СОТС стала подача СОЖ в зону резания в распыленном виде. Распыленная жидкость чаще всего подается в зону резания в виде факела воздушно-жидкостного аэрозоля. Аэрозоли СОЖ в воздухе представляют собой полидисперсную гетерогенную систему, в которой дисперсной фазой являются сферические движущиеся капли жидкости. Физико-технические свойства аэрозолей существенно отличаются от свойств как воздуха, так и исходных жидкостей, подвергаемых распылению [3]. Поэтому можно считать, что применение аэрозолей не столько самостоятельный способ подачи СОТС, сколько формирование новой технологической среды при обработке материалов резанием.

Технологические возможности СОЖ могут быть значительно увеличены за счет их активации. Одним из основных этапов при разработке технологии применения СОТС является выбор не только вида и метода ее подачи, но и способов их активации при подаче в зону резания. Активация трением и диспергированием — новый, но весьма перспективный вид активации, заключающийся в возбуждении молекул веществ, входящих в состав СОТС, в процессах трения и интенсивного механического диспергирования [2, 3]. При подборе режимов диспергирования можно создать такую степень активации СОТС, при которой она приобретает новые физико-химические свойства. При этом дополнительный

эффект вносят реакции с участием молекул воды и кислорода.

В настоящее время получение аэрозоля с определенными пропорциями жидкости и воздуха производится в установках, находящихся под давлением. Недостатком, сдерживающим широкое применение технологии обработки с подачей СОТС в виде аэрозоля, является сложность конструкции применяемых для этого устройств и их высокая стоимость [3, 4].

Новым способом, лишенным указанных недостатков, является технология подготовки и подачи в зону резания воздушно-жидкостного аэрозоля за счет диспергирования жидкости вихревыми потоками воздуха с последующим их распылением с использованием вихревых диспергаторов-распылителей [5]. В результате взаимодействия вихревых потоков образуется трехмерное силовое поле, которое характеризуется перепадами давления и скорости. Мощное энергетическое воздействие на распыляемую жидкость приводит к ее диспергированию, разрыву межмолекулярных связей, частичному испарению и электризации частиц и молекул жидкости, что обусловливает изменение межмолекулярного взаимодействия и процессов передачи энергии, отличающихся высокой скоростью.

Принципиальным отличием вихревой технологии подготовки и подачи СОТС в виде воздушно-жидкостного аэрозоля является особый характер процессов, связанных с усилением роли различных размерных эффектов вследствие значительной площади границ раздела фаз составляющих СОТС. При этом происходит эффективная активация СОТС вихревыми потоками за счет трения, высокочастотных колебаний, разрыва межмолекулярных связей в жидкостях. Кроме того, вихревой способ подготовки и подачи СОТС в виде воздушно-жидкостного аэрозоля обеспечивает возможность легкого образования аэрозолей, содержащих одновременно газ, капли масел и водных эмульсий [6]. Такие аэрозоли отличаются повышенными технологическими свойствами и обеспечивают при подаче СОТС в зону резания синергетический эффект за счет совместной реализации практически всех видов воздействия на процесс обработки: охлаждающего, смазывающего, химического, режущего и моющего.

Разработанные многофункциональные вихревые диспергаторы-распылители в отличие от известных устройств обеспечивают возможность подготовки и подачи СОТС в различных режимах. Так, вихревой энергопреобразователь обеспечивает подготовку и подачу струи холодного воздуха в зону резания, если не допускается применение СОЖ; вихревой диспергатор-распылитель жидкости обеспечивает подготовку и подачу в зону резания СОТС в виде воздушно-жидкостного аэрозоля; термодинамический диспергатор позволяет совместить подачу в зону обработки струи холодного воздуха с минимальной подачей распыленных СОЖ; устройство для распыления обеспечивает смешение и диспергирование в вихревой камере нескольких разнородных компонентов СОТС — воздуха, жидкости и порошков — для их совместного распыления.

Таким образом, новая вихревая технология подготовки и подачи СОТС в виде аэрозоля формирует требования к разработке комплекса устройств для подготовки и подачи СОТС при различных методах и условиях обработки.

Среди разработанных вихревых диспергаторов-распылителей можно выделить устройство для распыления[1], которое отличается простотой конструкции и позволяет получить охлажденную аэрозоль одновременно двух жидкостей, например водосодержащих эмульсий и масляных. Устройство работает от источника сжатого воздуха с давлением 0,2—0,4 МПа. При этом расход воздуха составляет 4—21 м^3/ч в зависимости от типоразмера диспергатора-распылителя. Расход жидкости регулируется в диапазоне 0—0,5 л/мин.

Скорость потока аэрозоля зависит от давления сжатого воздуха, подаваемого в вихревой диспергатор-распылитель. От него же зависят размер частиц распыляемой жидкости и их распределение в поперечном сечении факела аэрозоля. Оптимизация режимов распыления жидкости позволит направить высокоскоростной поток воздушно-жидкостного аэрозоля в зону контакта резца, стружки и детали и одновременно свести к минимуму образование капелек СОЖ на поверхности инструмента, детали и оснастки. Анализ результатов замера скорости потока при давлении сжатого воздуха на входе вихревой камеры 0,2 МПа показывает, что скорость потока аэрозоля после выхода из сопла распылителя сохраняется почти неизменной на расстоянии до 50—70 мм (рис. 1.). Затем начинает сказываться сопротивление окружающего воздуха, и скорость потока быстро падает.

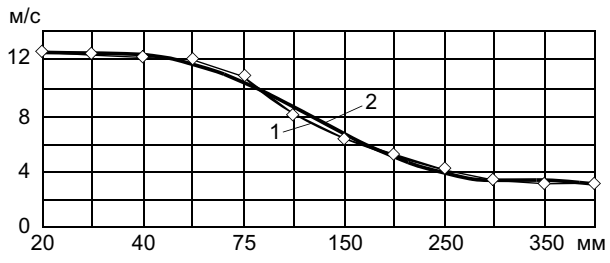


Рис. 1. Зависимость скорости потока аэрозоля от расстояния от сопла распылителя: *1* — экспериментальная зависимость; *2* — полиномиальная

[1] Патент 2234986 (РФ).

Для оценки влияния давления сжатого воздуха, подаваемого на вход вихревой камеры диспергатора-распылителя, на скорость потока аэрозоля измерили скорость на расстоянии 30 и 50 мм от сопла распылителя, изменяя давление сжатого воздуха в пределах 0,1—0,4 МПа (рис. 2).

Полученные результаты показывают, что с ростом давления воздуха увеличивается и скорость потока аэрозоля. Зависимость носит степенной характер и может быть описана полиномами, полученными с использованием программных средств Microsoft Excel. Различие в скорости на расстоянии 30 и 50 мм от сопла распылителя составляет 15—17 %, что позволяет с учетом предыдущих результатов рекомендовать такое расположение диспергатора-распылителя при подаче распыленных СОТС в зону резания. При этом угол расширения, характеризующий форму факела аэрозоля, составляет 10—12°. На расстоянии 30—50 мм от сопла диспергатора-распылителя 80—90 % капель распыляемой жидкости попадают непосредственно в зону резания, производя химическое, режущее, смазывающее, охлаждающее действие.

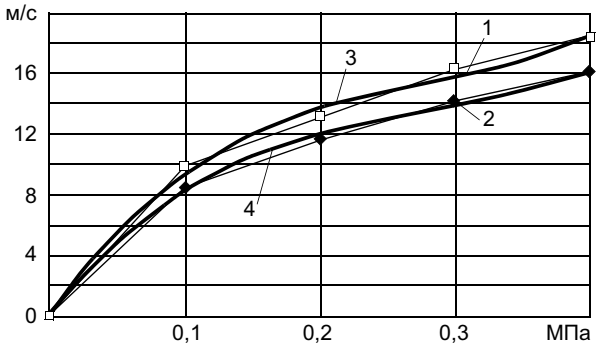


Рис. 2. Зависимость скорости потока аэрозоля от давления сжатого воздуха на входе вихревой камеры диспергатора-распылителя: *1*, *3* — расстояние от сопла 30 мм; *2*, *4* — то же 50 мм; *1*, *2* — экспериментальная зависимость; *3*, *4* — полиномиальная

Рис. 3. Распределение количества капель жидкости по радиусу мишени: 1, 2 — расстояние от сопла *l* равно 0,1 и 0,25 м соответственно; 3, 4 — полиномиальная зависимость, *l* равно 0,1 и 0,25 м соответственно

Содержание до 90 % капель жидкости в осевой зоне факела аэрозоля (рис. 3) позволяет доставлять практически все количество распыляемых СОТС в зону резания, при этом реализуются все действующие факторы СОТС, не образуется воздушный туман, обеспечивается безопасность оператора и экономия используемых СОТС.

В системах вихревой подготовки и подачи в зону резания воздушно-жидкостного аэрозоля доля СОЖ составляет менее 1 % воздушно-капельной струи. В результате СОЖ воздействует на зону резания и не оставляет следов на станке и детали, стружка сходит практически сухой и не требует дополнительной очистки при утилизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бердичевский Е. Г.* Смазывающе-охлаждающие средства для обработки материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
2. *Латышев В. Н., Наумов А. Г.* О смазочном и химическом действии внешней среды при резании металлов // Трение и износ. 2001. № 3. С. 342—348.
3. *Клушин М. Н., Тихонов В. М., Троицкая Д. Н.* Охлаждение и смазка распыленными жидкостями при резании металлов. Горький: Волго-вятское кн. изд., 1988. 123 с.
4. *Потапов В. А.* Применение механической обработки с минимальным количеством СОЖ на германских заводах // Машиностроитель. 1999. № 11. С. 46—52.
5. *Повышение* эффективности механической обработки роторов винтовых компрессоров / Н. Е. Курносов, А. В. Тарнопольский, А. В. Матвеев, В. В. Лобачев // Новые материалы и технологии — НМТ-2004. М.: МАТИ, 2004. Т. 2. С. 22—23.

Е. А. КУЧЕНЧЕНКО, бакалавр, Т. А. АСТАХОВА, бакалавр,
Д. А. БАБЫЛОВ, бакалавр, А. Н. ФЕОФАНОВ, д-р техн. наук
МГТУ "СТАНКИН"

Разработка автоматизированной подсистемы ведения описания узлов агрегатных станков и автоматических линий

Развитие станкостроинструментальной промышленности в большинстве стран осуществляется за счет новейших технологий, определяющих технический уровень всей продукции. Основные направления развития станкостроения в мире: повышение уровня автоматизации производства станкостроительной продукции; модульный принцип построения станков; повышение уровня автоматизации станков за счет применения современных сверхбыстродействующих устройств ЧПУ, систем технического зрения и информационных систем.

Создание высокопроизводительного оборудования, себестоимость изготовления деталей на котором позволит нивелировать высокую стоимость рабочей силы в развитых странах, приводит к серьезному изменению в производственных процессах и организации производства. Инновационный процесс обеспечивает максимально быстрое создание и совершенствование конкурентоспособных технических систем и технологий в мире. Одним из существенных направлений комплексной автоматизации машиностроительных предприятий серийного и массового производств является создание и модернизация имеющихся агрегатных станков.

Агрегатными называют станки, собранные из стандартных (нормализованных) узлов, предназначенных для обработки одинаковых или однотипных деталей, поэтому разнообразие типов этих узлов невелико и их габаритные размеры строго ограничены. Разнообразие компоновок таких станков является следствием множества решаемых технологических задач, разнообразия применяемого режущего инструмента, размеров и форм обрабатываемых заготовок. Разрабатывая компоновку каждого конкретного станка, необходимо учитывать особенности конструкций исполнительных элементов: систем ориентации инструмента, узлов резания и подачи, транспортной и несущей систем.

Перед станкостроением поставлена задача создания комплексной системы автоматизированного проектирования агрегатных станков (АС) и автоматических линий. Задача комплексной автоматизации проектирования АС является весьма сложной и трудоемкой, для ее решения необходимо создать систему описания детали, для обработки которой проектируется станок, и технических условий на ее изготовление, а также всех проектируемых объектов: компоновки станка, конструкции зажимных приспособлений и др.

Спецификации на элементы унифицированных узлов обширны и многотомны, поэтому для упрощения доступа к необходимой информации разработаны БД описания узлов агрегатных станков. В них хранится информация об узлах и элементах конструкций АС. Структура информации об узлах и элементах конструкций АС легко укладывается в реляционную модель, а сам принцип создания АС из унифицированных узлов заметно облегчает задачу формирования структуры данных.

Структура таких БД включает множество таблиц, в каждой из которых хранится информация только об одном элементе АС. Описание каждого узла в БД представлено всего двумя таблицами, что делает ввод информации более удобным. С таблицами, содержащими типовые описания компонентов АС, связаны типом "один — ко — многим" таблицы с габаритными размерами соответствующих узлов с геометрическими образами и сопутствующей информацией — технической документацией, файлом с метаданными для работы в среде визуального проектирования. Такое хранение данных полностью соответствует третьей нормальной форме и упрощает механизм доступа к данным для расчетов и построение параметрических чертежей.

При большом объеме данных и максимальной нагрузке числа пользователей на БД значительно снижается ее производительность. Для эффективной работы БД возможно хранить в ней только небольшое количество информации, в противном случае она не будет отвечать требованиям по скорости доступа к данным и их обработки.

Учитывая эти недостатки, предложено создать новую БД, разбитую по видам подсистемы элементов конструкций. Проанализировав один из таких видов, стало понятно, что разные подвиды содержат много общей информации, в том числе такую, которая отличает один от другого. Такого рода данные позволяют занести информацию об одном виде

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 8

Вид бабки	Габаритные размеры бабки															
Расточная	B	H	H_1	L	L_1		l_9	D	D_1			d	d_1	d_2		d_8
Сверлильная	B	H	H_1	L	L_1	L_2	L_3	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	d_2	d_3	d_4

Обозначения. B, H, L — ширина, высота и длина корпуса бабки соответственно; H_1 — высота до оси шпинделя; L_1 — длина передней крышки; L_2 — длина хвостовика; l_9 (L_3) — длина задней бабки; D, D_1 — диаметр подшипников передней и задней крышек соответственно; D_2, D_3 — наружный и внутренний диаметры шпинделя соответственно; d — задний диаметр шпинделя; d_1 — диаметр крепления передней крышки; d_2 — диаметр штифтов крепления бабки; d_3 — диаметр шейки шпинделя; d_8 — диаметр вспомогательного штифта.

в одну таблицу, что упростит доступ к ней. Связь между узлами в БД осуществляется типом "многие — ко — многим", поэтому у пользователей есть возможность выбирать удобную для детали компоновку.

Рассмотрим фрагмент таблицы, в которой хранится информация об одном из видов, на примере системы узлов резания. Эта система содержит различные виды бабок, например расточные, фрезерные, сверлильные и т. д. Для начала проанализировали габаритные размеры бабок (см. таблицу).

У каждого подвида бабок есть общие геометрические параметры, которые следует объединить, и параметры, различающие бабки по разным видам. Далее была сформирована таблица, учитывающая габаритные размеры бабок всех подвидов.

Таким образом, можно минимизировать число таблиц в БД, увеличив тем самым ее быстродействие, упростить ее структуру и обеспечить более простой доступ к данным.

Разработанная БД не будет перенасыщена и позволит пользователю быстрее находить нужные ему данные, а также работать в одной БД бóльшему числу пользователей (ранее это было невозможно).

В. В. НЕВЕРОВ, инж., В. В. КАРИХ, канд. техн. наук
(Липецкий государственный технический университет),
В. А. НОСОВ, инж.
(ООО "Чугунспецстрой")

Технология изготовления биметаллических дисковых и кромкокрошительных ножей

В настоящее время биметаллические изделия, например металлорежущий и металлообрабатывающий инструмент, находят все большее применение в промышленности. Их основную часть изготовляют, как правило, из углеродистой конструкционной стали, а рабочую, испытывающую основную нагрузку и от характеристик которой зависит срок эксплуатации всего изделия, — из материалов с требуемым комплексом механических свойств. Себестоимость их изготовления обычно меньше, чем изделий, выполненных цельными из таких дорогостоящих материалов, как инструментальные стали и сплавы цветных металлов. Срок эксплуатации биметаллических изделий может быть выше по сравнению с цельными, изготовленными из инструментальных сталей, в результате возможности использования в качестве рабочей части износостойких сплавов.

Так, в листопрокатном производстве металлургических предприятий для обрезки кромок стального листа и их измельчения применяют кромкокрошительные и кромкообрезные ножи, изготовленные, как правило, цельными из инструментальных сталей ХВГ, 5ХВ2С, 6ХВ2С и др. Однако в процессе эксплуатации и неоднократных переточек до ремонтного размера используется только 5—7 % материала ножа, остальная часть идет в металлолом, что нерационально. Авторами разработан и испытан способ изготовления изделий данных видов путем наплавки режущей кромки из износостойких высокопрочных сплавов на основу из низкоуглеродистой стали Ст3. Общий вид биметаллических изделий кромкокрошительного и кромкообрезного ножей приведен на рис. 1, 2 соответственно.

В качестве материала для режущей кромки использовали износостойкий сплав 90Х4М4ВФ твердостью 60—62 HRC. Наплавку производили вручную покрытыми электродами диаметром 4 мм током 130—140 А при напряжении дуги 22—23 В. Низкие значения тока и напряжения обусловлены стремлением к уменьшению погонной энергии с целью пре-

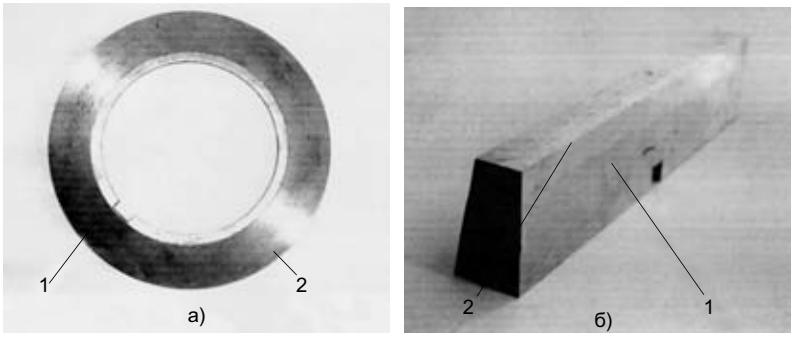


Рис. 1. Общий вид биметаллических кромкообрезного (*а*) и кромкокрошительного (*б*) ножей: *1* — основа; 2 — наплавленный металл режущей кромки

дупреждения роста зерна при наплавке и ухудшения механических свойств. Химический состав применяемых наплавочных материалов приведен в таблице.

Однако при наплавке высокопрочных сплавов возникают затруднения, связанные с образованием трещин, что недопустимо для металлообрабатывающего инструмента из-за высокой вероятности сколов в процессе реза. Для предупреждения образования трещин использовали технологический прием наплавки короткими участками. При этом внутренние напряжения локализуются в этих участках, что значительно снижает вероятность образования трещин. Схемы наплавки режущей кромки кромкокрошительного и кромкообрезного ножей приведены на рис. 3.

На основании проведенных исследований [1] с использованием расчетной методики определения внутренних напряжений и деформаций [2] установлено, что основными параметрами, влияющими на допускаемую длину валика наплавленного металла, являются его физико-механические свойства — предел прочности на разрыв $\sigma_в$, температурный коэффициент линейного расширения α, относительное удлинение δ, модуль упругости E, температура критической точки T_{Ac_3}, а также площадь поперечного сечения валика $F_н$. В итоге внутренние напряжения в наплавленном металле

$$\sigma_{вн} = E(\alpha T_{Ac_3} - \delta). \quad (1)$$

Для определения допустимой длины валика наплавленного металла необходимо рассчитать момент от действия усадочной силы остывающего металла, который находится из выражения для вычисления напряжений в балке [3]:

$$\sigma_{вн} = \frac{M}{W}, \quad (2)$$

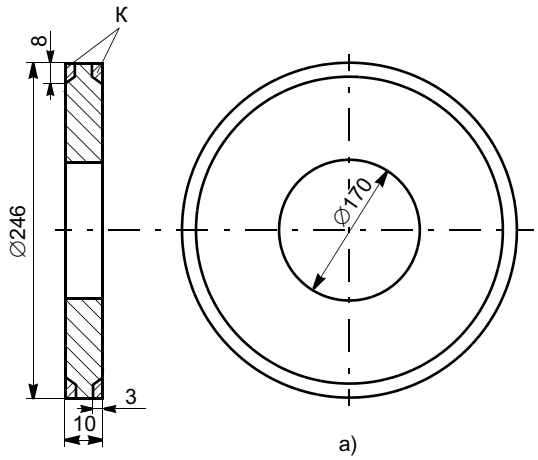
где W — момент сопротивления сечения (в данном случае принято прямоугольное сечение $W = (bh^2)/6$).

Тогда момент, создаваемый внутренней усадочной силой $P_{ус}$,

$$M = \sigma_{вн} W. \quad (3)$$

При отсутствии трещины в наплавленном металле допустимая усадочная сила не должна вызывать напряжения больше предела прочности на разрыв наплавляемого материала, т. е.

$$P_{ус.доп} = \sigma_в F_н. \quad (4)$$



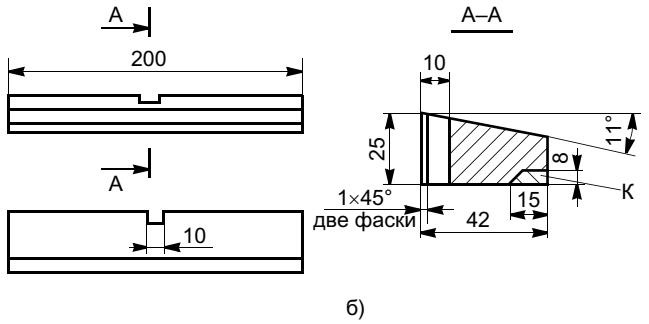


Рис. 2. Схема кромкообрезного (*а*) и кромкокрошительного (*б*) ножей (*К* — наплавленная режущая кромка)

Сталь	Содержание элемента, %								
	C	Co	Cr	W	Mo	V	Si	S	P
90Х4М4ВФ	0,6—1,2	—	2,8—4,3	0,9—1,7	2,4—4,6	0,6—1,3	0,2—0,5	≤0,015	≤0,015
10К18В11М10Х3СФ	0,10—0,14	16,5—17,8	1,5—2,5	—	8,2—9,7	0,3—0,6	0,7—0,9	≤0,015	≤0,015
110Х5М8В2Ф2С2Ю	0,9—1,1	—	3,8—4,5	1,5—2,1	6,8—7,3	1,4—1,7	1,3—1,6	≤0,015	≤0,015

В результате допускаемая длина валика наплавленного металла

$$L = M/P_{\text{ус.доп}}. \quad (5)$$

Кроме того, известно положительное влияние подогрева на снижение вероятности образования трещин. В работах [4, 5] имеются данные о значениях $\sigma_в$ и δ при температуре до 600 °С, используя которые можно определить допустимую длину валика наплавленного металла, свободного от трещин, при использовании предварительного и (или) сопутствующего подогрева. Применяя данный метод расчета, можно определить длину валика наплавленного металла для используемых в конкретном технологическом процессе наплавочных материалов 90Х4М4ВФ, 10К18В11М10Х3СФ и 110Х5М8В2Ф2С2Ю (рис. 4).

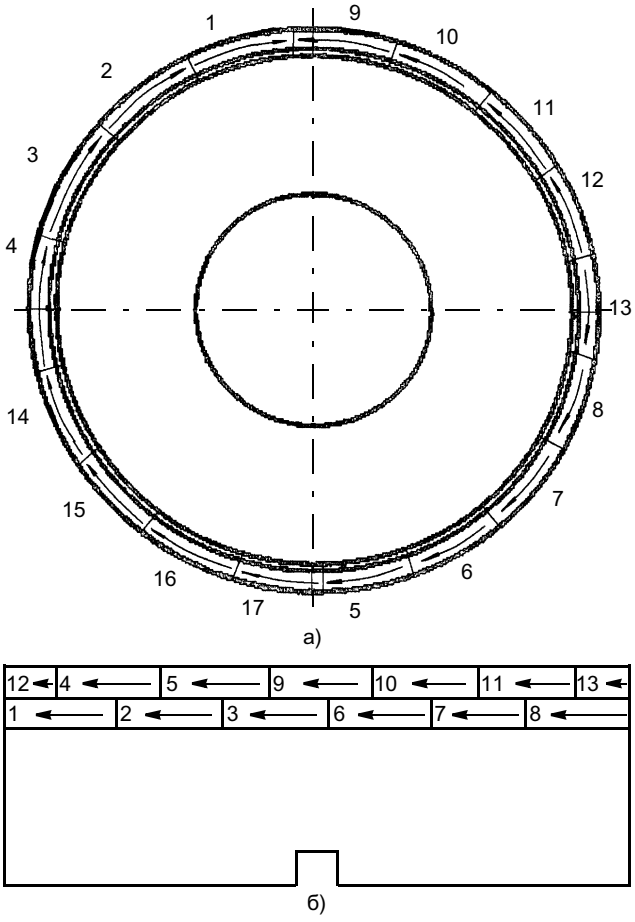


Рис. 3. Схема наплавки режущих кромок кромкообрезного (*а*) и кромкокрошительного (*б*) ножей (стрелками показано направление наплавки, цифрами — порядок наложения валиков)

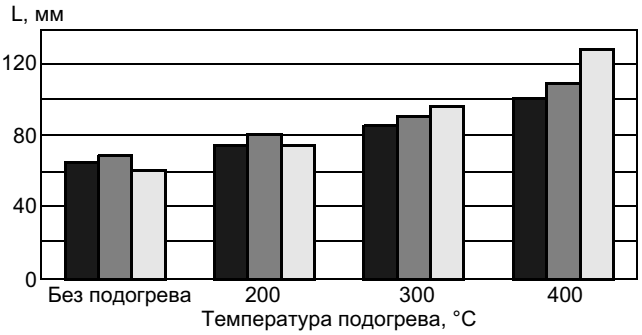


Рис. 4. Длина валика металла, наплавленного с использованием предварительного подогрева и без него: ■ — сталь 90Х4М4ВФ; ▩ — 10К18В11М10Х3СФ; □ — 110Х5М8В2С2Ю

При использовании предварительного и сопутствующего подогрева в слое наплавленного металла происходит релаксация напряжений примерно по тому же механизму, как при соответствующей термической обработке (отличие только во времени выдержки). Следовательно, при охлаждении от таких температур внутренние напряжения увеличиваются незначительно.

Таким образом, при подогреве возможно увеличение длины валика наплавленного металла, свободного от трещин, что положительно сказывается на технологичности всего процесса наплавки и вполне согласуется с имеющимися литературными данными. По разработанной технологии проведены производственные испытания кромкокрошительных ножей, применяемых при обработке стального проката в ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат". Ножи с наплавленной на основу из низкоуглеродистой стали режущей кромкой из сплава 90Х4М4ВФ отличаются двукратным увеличением износостойкости от ножей, выполненных цельными из стали 5ХВ2С.

ВЫВОД

Технология наплавки короткими участками позволяет получать наплавленный слой износостойких материалов без трещин, что расширяет область их использования. Разработанная расчетная методика длины участков в зависимости от физико-механических свойств наплавляемых сплавов позволяет использовать ее для разработки технологического процесса изготовления биметаллических изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Неверов В. В., Добрынин В. П., Карих В. В.* Методика определения внутренних напряжений в наплавленном износостойком металле // Сварка и контроль — 2004. Т. 3. Сварочные материалы. Технология. Сварочное оборудование. Пермь, 2004.
2. *Проектирование* технологии изготовления сварных конструкций / Н. О. Окерблом и др. Л.: Судпромгиз, 1963.
3. *Дарков А. В., Шпиро Г. С.* Сопротивление материалов: Учебник для втузов. М.: Высшая школа, 1975.
4. *Сварка* в машиностроении: Справочник / Под ред. А. А. Акулова. М.: Машиностроение, 1979. Т. 2.
5. *Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г.* Специальные стали. М.: Металлургия, 1985. 408 с.

Л. А. КОНДРАТЕНКО, канд. техн. наук
Фирма "ТЕХНАБ" (Подольск, Московская обл.)

Оценка работоспособности рабочих органов роликовой вальцовки

Закрепление теплообменных труб с помощью роликовых вальцовок широко применяют в различных отраслях народного хозяйства. Несмотря на это, в процессе вальцевания оценка работоспособности контактирующих деталей является актуальной задачей.

Существует много критериев разрушения: по использованию коэффициента живучести металла; критерию работы деформационного упрочнения; учету структурной чувствительности материала к образованию трещин, по критерию Одинга и др. [1].

В данной работе воспользуемся критерием Одинга, в соответствии с которым материал разрушается после подвода к его кристаллической решетке удельной энергии

$$A_q = \rho c T^\circ, \qquad (1)$$

где ρ, c — плотность и удельная теплоемкость металла соответственно; T° — абсолютная температура плавления.

Удельная потенциальная энергия, затрачиваемая на деформацию единицы объема детали,

$$A_{\text{пр}} = 0{,}5\sigma_i^2 / E_i, \qquad (2)$$

где σ_i — интенсивность напряжений; E_i — обобщенный модуль упругости [2].

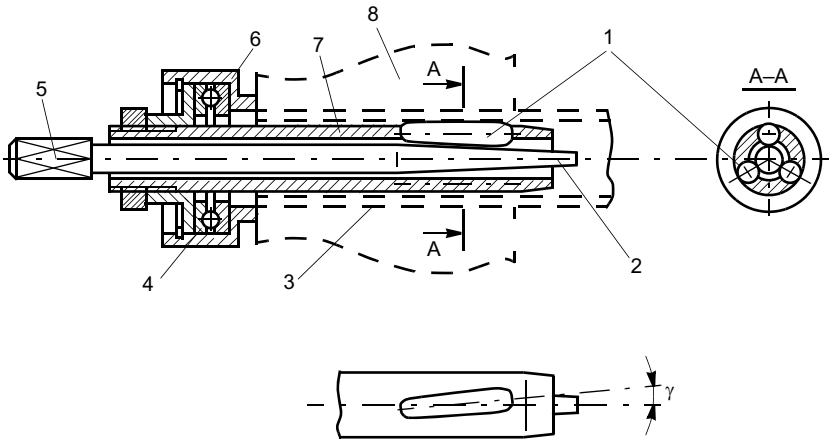


Рис. 1. Схема роликовой вальцовки: *1* — конические ролики; *2* — веретено; *3* — труба; *4* — упорный подшипник; *5* — квадрат веретена; *6* — обойма; *7* — корпус; *8* — трубные доски

В этом случае удельная мгновенная мощность, выделяемая в сечении,

$$N_{\text{пр}} = \sigma_i E_i^{-1} d\sigma_i / dt. \qquad (3)$$

Рассмотрим подробнее процесс закрепления трубы. На рис. 1 приведена схема роликовой вальцовки. Перед началом работы ролики выдвигают от торца обоймы на некоторое расстояние L посредством вывинчивания корпуса из упора. После этого упор закрепляется контргайкой либо винтом. Поверхность отверстия, а также участок внутренней и всю наружную поверхности труб очищают от загрязнений. Трубы размещаются в трубных досках. Вальцовка вводится в трубу до упора торца обоймы в зеркало трубной доски. После присоединения квадрата веретена к валу привода и его включения веретено начинает вращаться и приводит во вращение относительно своей оси ролики. Поскольку они повернуты на угол $\gamma = 1{,}5 \div 4{,}0^\circ$ относительно оси веретена, то в случае его вращения по направлению движения часовой стрелки из-за трения происходит вращение роликов против часовой стрелки. При этом из-за взаимного трения роликов и веретена последнее затягивается в трубу (при обратном вращении выдвигается наружу). Тем самым вследствие клинового эффекта труба деформируется в радиальном направлении.

На производстве в качестве привода веретена такого инструмента обычно применяют либо электрические, либо пневматические вальцовочные машины, снабженные показывающим прибором и автоматически останавливающиеся при достижении заданного крутящего момента $M_{\text{кр}}$.

Ролик характеризуется следующими параметрами: максимальным диаметром D_{rm}; рабочей длиной $l_{\text{р}}$; конусностью $K_{\text{р}}$ (например, 1:80, 1:60). Он контактирует с веретеном, также имеющим максимальный диаметр D_{bm} и конусность $K_{\text{в}}$ (1:40; 1:30).

Под действием вращающего момента развиваются соответствующие напряжения [3]:

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 8

между трубой и стенкой отверстия

$$\sigma_к = -4M_{кр}\sin\gamma/(\delta\pi l'_{крв} z d_{рс}\operatorname{tg}\alpha_в); \quad (4)$$

между роликами и веретеном

$$\sigma_{к\max} = 190{,}7[F_{rci}(r_{вс} + r_{рс})/(l_{крв} r_{вс} r_{рс})]^{1/2}, \quad (5)$$

где δ — толщина стенки трубы; $l'_{крв}$ — фактическая длина контакта прижимаемой трубы со стенкой отверстия, равная $l_{крв} - b_к$ ($l_{крв}$ — общая длина контакта, $b_к$ — суммарная ширина радиальных канавок в стенке отверстия); z — число роликов; $d_{рс}$, $r_{рс}$, $r_{вс}$ — средние в процессе вальцевания диаметр и радиус сечения ролика и веретена соответственно; $\alpha_в$ — угол конусности веретена; $F_{rci} = \sin\gamma(z r_{рс}\operatorname{tg}\alpha_в)^{-1} M_{кр}$ — радиальное усилие на ролик.

Для эффективного использования предлагаемого метода показывающие приборы на вальцовочных установках должны быть тарированы.

Частота вращения ролика относительно трубы

$$\Omega_р = \pi n_в d_{вс}/(30 d_{рс}), \quad (6)$$

где $n_в$ — скорость вращения веретена; $d_{вс}$ — средний диаметр веретена.

Во время вальцевания ролик, вращающийся с частотой $\Omega_р$, прижимается к трубе веретеном, вращающимся относительно собственной оси с частотой Ω. При этом по мере углубления веретена в трубу силовое взаимодействие между роликом и веретеном возрастает. Таким образом, при сборке одного узла крепления за цикл однократного вальцевания крутящий момент $M_{кр}$, действующий на веретено, изменяется от минимального до максимального значения (рис. 2). Контактное напряжение между роликом и веретеном обусловливает работоспособность рабочих органов вальцовки и зависит от крутящего момента. Под действием радиального усилия F_{rsi} в сечении ролика развиваются напряжения. Закономерность изменения интенсивности напряжений можно описать выражением

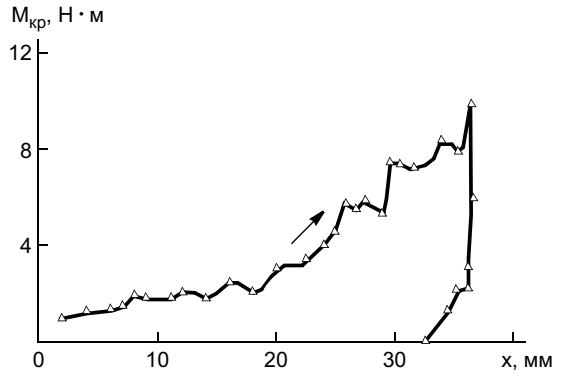


Рис. 2. Зависимость крутящего момента от осевого перемещения веретена при вальцевании трубы

$$\sigma_i = a\tau_в^n, \quad (7)$$

где $\tau_в$ — безразмерное время, равное $t/t_в = x/x_m$ ($t_в$ — время вальцевания; x, x_m — соответственно текущее и конечное осевые перемещения веретена); a, n — коэффициенты.

С учетом выражений (2) и (3) удельная мгновенная мощность, затрачиваемая на деформацию кристаллической решетки,

$$N_{пр} = \sigma_i E_i^{-1} d\sigma_1/d\tau = a^2 n E_i^{-1} \tau^{2n-1}. \quad (8)$$

Тогда удельная работа за весь цикл однократного вальцевания

$$A_{цвр} = \int_0^1 a^2 n E_i^{-1} \tau_в^{2n-1} d\tau = 0{,}5 a^2 E_i^{-1}. \quad (9)$$

Коэффициент a определим при $\tau_в = 1$ из соотношения $\sigma_i = a\tau_в^n$. Этот коэффициент равен максимальной интенсивности напряжения в конце вальцевания, т. е. $a = \sigma_{i\max}$.

В процессе вальцевания ролик, прижимаясь к цилиндрической поверхности трубы, изгибается. Поскольку проекция b расстояния между точками контакта ролика с трубой на плоскость, перпендикулярную оси корпуса вальцовки, равна $l_р\sin\gamma$, то напряжение изгиба

$$\sigma_z = 8F_{rsi} b/(\pi d_{ср}^3). \quad (10)$$

В связи с тем, что ролики и веретено, изготовляемые обычно из стали ШХ15 (61—63 HRC) во время работы пластически не деформируются, то модуль упругости для роликов можно принять равным $E_i = E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа.

При вальцевании кроме изгибающего момента на ролик действует также сжимающая сила F_{rsi}. Остальные усилия не учитываем. Тогда интенсивность напряжения

$$\sigma_{i\max} = 2^{-1/2}[(\sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z)^2]^{1/2}. \quad (11)$$

Рассмотрим пример закрепления трубы из стали 15ХМ размером ∅25 × 1 мм. Применяемая вальцовка имеет следующие параметры: $\Omega_р$ = $= \pi 400 \cdot 8{,}88/(7{,}4 \cdot 30) = 50{,}24$ рад/с; $D_{rm} = 7{,}7$ мм; $l_р = 35$ мм; $K_р = 1{:}60$; $d_{ср} = 7{,}4$ мм; $d_{вс} = 8{,}88$ мм. Радиальная нагрузка $F_{rsi} = 2750$ Н. Контактное напряжение между веретеном и роликом $\sigma_{рв} = 1200$ МПа. При вальцевании с крутящим моментом $M_{кр}$ = = 27,3 Н · м обеспечивается контактное напряжение между трубой и стенкой отверстия, равное 50 МПа.

Определим интенсивность напряжения.

Напряжение от изгиба σ_z = 20,9 МПа.

В процессе вальцевания ролик вращается и сжимается диаметрально действующими усилиями от веретена и трубы. Поэтому примем, что радиальные напряжения в рабочем сечении ролика близки контактным напряжениям, т. е. σ_r = 1200 МПа. Окружные и касательные напряжения не учитываем.

Тогда интенсивность напряжений $\sigma_{i\max}$ = = 1193,2 МПа.

Учитывая изложенное, ресурс ролика при условии отсутствия дефектов в сечении и непрерывной работе может составлять

$$Z_{\text{р}} = \rho c T_s / [0{,}5 E^{-1} \sigma_{i\max}^2] = 1948 \text{ операций}. \quad (12)$$

При контактном давлении $\sigma_{\text{к}}$ между трубой и стенкой отверстия равном 70 МПа, F_{rsi} = 3850 Н, $\sigma_{\text{рв}}$ = 1407 МПа; σ_z = 29,3 МПа; $\sigma_{i\max}$ = 1913,3 МПа. В этом случае ресурс Z = 757 операций.

Установлено, что при закреплении таких труб в регенераторах РВП-3600 средний ресурс ролика составил около 1530 операций вальцевания. Следовательно, полученные формулы с учетом параметров вальцовки и режимов вальцевания позволяют сравнительно точно оценить ресурс роликов.

На рис. 3 приведена схема действующих сил на веретено. Оно подвергается в основном воздействию как касательных ($\tau = 16M_{\text{кр}}/(\pi d_{\text{вс}}^3)$, так и вращающихся радиальных сил, действующих в точках с трех сторон.

Интенсивность напряжения

$$\sigma_{i\text{в}} = 2^{-1/2}[2(\sigma_r)^2 + 6\tau^2]^{1/2}. \quad (13)$$

В рассматриваемом случае имеет место в основном объемное сжатие, поэтому при анализе деформаций следует использовать модуль всесторонней объемной упругости $E_V \cong 3E$. Тогда по аналогии удельную работу за весь цикл однократного вальцевания можно описать с помощью выражения

$$A_{\text{цвв}} = \int_0^1 a_1^2 n E_V^{-1} \tau_{\text{в}}^{2n-1} d\tau_{\text{в}} = 0{,}5 a_1^2 E_V^{-1}, \quad (14)$$

где $a_1 = \sigma_{i\text{в}\max}$.

Определим интенсивность напряжений в веретене.

Касательные напряжения в рабочем сечении τ = 198,7 МПа. Тогда $\sigma_{i\text{в}\max}$ = 1203,6 МПа.

Следовательно, ресурс веретена может составлять

$$Z_{\text{в}} = 3\rho c T_s E / [0{,}5 \sigma_{i\text{в}\max}^2] = 5743 \text{ операции}. \quad (15)$$

Результаты экспериментальных исследований на регенераторах РВП-3600 подтверждают ресурс веретена (5901 операция).

Теплообменные аппараты содержат большое число узлов крепления. В процессе непрерывной работы из-за охлаждения в результате теплоотвода в окружающий воздух или металл трубной доски рабочие органы не успевают охладиться, поэтому ресурс будет минимальным. Однако в случае качественного охлаждения срок службы вальцовки может быть увеличен.

Если вальцовку применяют в работе периодически с длительными перерывами, то ресурс следует рассчитывать, учитывая режимы, где напряжения превышают предел выносливости материала σ_{-1}. В этом случае происходящие искажения кристаллической решетки накапливаются.

Из предыдущих вычислений видно, что наибольшее влияние на ресурс оказывают контактные напряжения между роликом и веретеном, которые можно записать в следующем виде:

$$\sigma_{\text{к}\max} = 190{,}7 k_{m\sigma}^{1/2} M_{\text{кр}}^{1/2}, \quad (16)$$

где $k_{m\sigma} = \sin\gamma(r_{\text{в}} + r_{\text{рс}})/[l_{\text{крв}} r_{\text{в}} r_{\text{рс}}^2 z \text{tg}(\alpha_{\text{в}})]$.

Тогда для ролика накопленная удельная энергия за однократное вальцевание

$$A_{\text{цвр1}} = \int_{\tau_1}^1 a^2 n E^{-1} \tau_{\text{в}}^{2n-1} d\tau_{\text{в}} = 0{,}5\sigma_{i\max}^2 E^{-1}(1 - \tau_1^{2n}), \quad (17)$$

где x_{-1}, τ_1 — соответственно смещение веретена, при котором напряжения превышают предел уста-

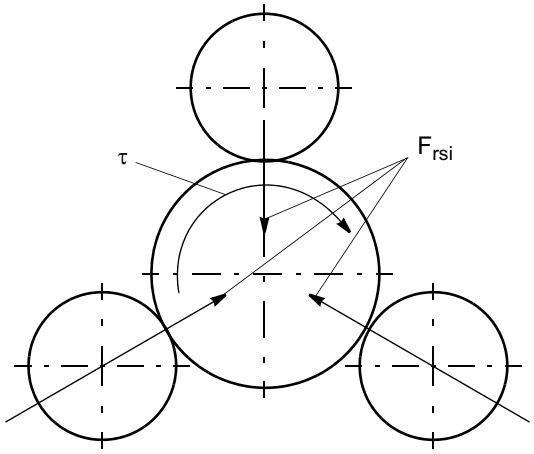


Рис. 3. Схема действующих сил на веретено

лости, и безразмерное время, соответствующее этому смещению и равное x_1/x_m.

Используя выражение (14), ресурс ролика можно определить следующим образом:

$$Z_{р1} = \rho c T_s / [0{,}5 E^{-1} \sigma^2_{i\max} (1 - \tau_1^{2n})]. \qquad (18)$$

Аналогично ресурс веретена

$$Z_в = 3 E \rho c T_s / [0{,}5 \sigma^2_{iв\max} (1 - \tau_1^{2n})]. \qquad (19)$$

Рассмотрим закрепляемую трубу. В работе [3] описан процесс деформации трубы, из которого следует, что вначале профиль вальцуемого участка имеет треугольнообразную форму, вращающуюся относительно оси. После контакта вершин с поверхностью отверстия происходит пластический изгиб образованных хорд, при котором крутящий момент резко, но ступенями, возрастает (см. рис. 2).

Ролики при обкатывании по трубе воздействуют в каждой точке внутренней поверхности трубы ($3r_{вс}/r_{рс}$) раз за один оборот веретена (для трехроликовой вальцовки). При этом в каждой точке напряжения равны или несколько превышают предел текучести трубы $\sigma_т$. Кроме того, ролики деформируют в радиальном направлении прилегающие к ним поверхностные слои трубы. В процессе вдавливания из-за близости атомов металлов роликов и внутреннего поверхностного слоя трубы возникают силы адгезии, которые преодолеваются обкатыванием роликов.

В итоге совершается работа, достаточная для отделения чешуек металла трубы. Заметим, что шелушение имеет место и на поверхностях роликов и веретен, однако это явление там происходит уже после большого числа вальцеваний и при значительных нагрузках.

Производственный опыт показывает, что шелушение часто возникает после третьего вальцевания одной и той же трубы. Однако имеются данные, например для труб размером ∅16 × 2,5 мм из стали 10Х2М, что шелушение наблюдается на этапе подвальцовки — прижатия под сварку конца трубы на участке длиной 5—6 мм к стенке отверстия.

Этот процесс, как и ряд других, требует дальнейших исследований.

Несколько уменьшить описанный дефект можно посредством нанесения смазки на ролики. Тогда, несмотря на некоторое замедление процесса вальцевания из-за дополнительного проскальзывания роликов, улучшается качество обработки поверхностей. Однако в этом случае следует учитывать возможное загрязнение поверхности.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный метод позволяет с приемлемой точностью оценить ресурс рабочих органов роликовой вальцовки.

2. Число допускаемых вальцеваний теплообменной трубы с учетом ее свойств и нагрузки обычно при нормальном закреплении, обеспечивающем герметичность и требуемое усилие сдвига, составляет 2—4 и ограничено появлением шелушения поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Динамика*, прочность и надежность элементов инженерных сооружений / Л. В. Глухов, С. Д. Иванов, Н. В. Лукашина, И. Н. Преображенская. М.: АСВ, 2003. 303 с.
2. *Феодосьев В. И.* Сопротивление металлов. М.: Наука, 2001. 588 с.
3. *Кондратенко Л. А.* Колебания и методы управления скоростью движения технологических объектов. М.: МГОУ, 2005. 448 с.

Вниманию подписчиков!

Напоминаем Вам, что оформить подписку на журнал можно с любого месяца в любом почтовом отделении связи.

Подписной индекс в каталоге Агентства "Роспечать" — 79494,

в Объединенном каталоге "Пресса России" — 27869,

в каталоге "Почта России" — 60190.

М. М. ШТРИКМАН, д-р техн. наук
ОАО "НИАТ"

Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (аналитический обзор)
Ч. I

Более пяти лет прошло с первой публикации в России [1], затем в Украине [2] обзора зарубежных сообщений о разработке процесса сварки трением линейных соединений, названного за рубежом сваркой трением с перемешиванием (СТП). Анализ сообщений о СТП на различных симпозиумах, а также множества научно-технических публикаций за этот период свидетельствует об интенсивных исследованиях процесса и расширяющемся практическом применении его в различных отраслях промышленности, главным образом для изготовления сварных конструкций из алюминиевых сплавов.

Термомеханические процессы при сварке

В базовом процессе СТП, известном в России с 1967 г.[1] и реализованном за рубежом[2] в 90-х годах, вращающийся инструмент (рис. 1), содержащий корпус *1*, рабочий стержень *2* с различным рельефом поверхности и опорный бурт *3*, медленно погружают в стык деталей на глубину, примерно равную толщине соединяемых кромок; при этом опорный бурт опирается на поверхность кромок. Материал кромок за счет теплоты, выделяющейся при трении, нагревается до пластичного состояния, вследствие чего уменьшается усилие, действующее на инструмент. При поступательном перемещении вращающегося инструмента по стыку пластическое течение выносит материал в зону, освобождающуюся сзади движущегося инструмента. При этом образуется шов. Одним из важнейших факторов, наиболее заметно влияющих на структуру шва и формирование соединения при СТП, является конструкция инструмента, особенно таких его элементов, как рабочий стержень и опорный бурт. Они контактируют с материалом, нагретым за счет работы сил трения до пластичного состояния, и формируют потоки пластического течения. При этом сам инструмент и особенно его рабочий стержень подвергаются высоким термомеханическим нагрузкам. На разогретый рабочий стержень одновременно действуют крутящий момент и знакопеременные циклические изгибающие силы. Сведения о нагреве инструмента в процессе СТП расходятся. В работе [3] по результатам термомеханического анализа с моделированием процесса СТП построены температурные поля. Показано, что максимальные температуры (600 °С и более) достигаются вблизи поверхности опорного бурта у основания рабочего стержня. В работе [4] на основании результатов математического анализа соотношения внешних сил и сил деформации утверждается, что на тепловложение в инструмент при СТП приходится примерно 50 % вводимой мощности. В работе [5] авторы отмечают, что энергия, затраченная на тепловложение в инструмент по мере его нагрева в период от начала процесса СТП до выхода на стационарный тепловой режим, может снижаться от 20 и более до 10 % общей производимой энергии (рис. 2). Авторы работы [6] путем моделирования процесса доказывают, что при полностью установившемся тепловом режиме на тепловложение в инструмент затрачивается до 2 % вводимой тепловой энергии. Такое различие связано, возможно, с точностью принятых авторами разных методик, а также с тем, что исследованы, по-видимому, разные стадии процесса СТП.

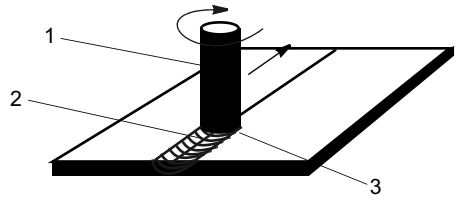


Рис. 1. Схема процесса СТП

Более достоверным представляется результат, полученный экспериментально [7] прямым замером температуры нагрева инструмента в процессе СТП листов из алюминиевого сплава 6061-Т6 тол-

[1] А. с. 195846 (СССР).
[2] Патент 92/02203 (Великобритания).

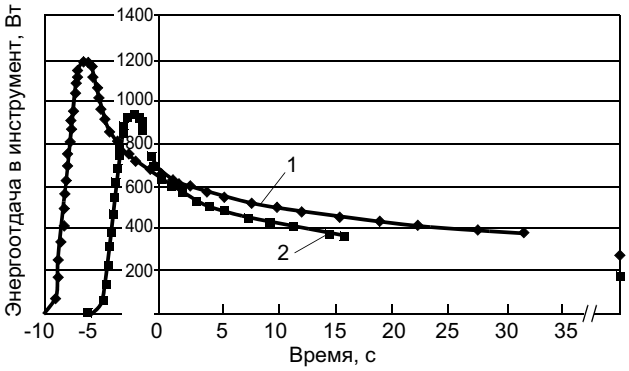


Рис. 2. Прогнозируемая потеря тепловой энергии во вращающемся инструменте от начала его перемещения до выхода на стационарный режим при СТП сплавов 6082-Т6 + + 2024-Т4 (*1*) и АМ60 + АМ60 (*2*)

щиной 3 мм при разных параметрах режима сварки. При этом использована система телеметрии (принцип работы системы не приведен), с помощью которой результаты измерения температуры передавались с термопар, закрепленных в различных участках инструмента на разном расстоянии от поверхности (рис. 3, *а*), в приемное компьютерное устройство. Результаты измерения показали, что с увеличением частоты вращения температура инструмента повышается (рис. 3, *б*), температура на поверхности опорного бурта инструмента составляет около 530 °С (определена экстраполяцией) и по мере удаления от поверхности снижается по линейной зависимости; при увеличении скорости сварки температура опорного бурта инструмента практически не изменяется. Однако авторы не приводят результаты измерения температуры рабочего стержня, хотя в него встроена термопара, как показано на схеме (см. рис. 3, *а*).

Значительно большее число публикаций связано с определением температур нагрева разных зон сварного соединения при СТП. Температурные поля в зоне соединения определяют физическую возможность пластического течения разогретого материала и получения качественного формирования структуры шва. Следует отметить, что большинство специалистов, исследующих этот вопрос [3—6, 8, 9], используют моделирование процесса для построения тепловых полей. Однако сообщаемые разными авторами результаты расчетов отличаются значительным разбросом значений максимальных температур нагрева в зоне сварки при СТП алюминиевых сплавов — от 450 до 660 °С.

В работах [7, 10—12] приведены результаты измерения температуры нагрева материала в разных точках зоны соединения с помощью термопар и получены реальные картины тепловых полей при СТП алюминиевых сплавов. В сообщаемых результатах интервал значений максимальных температур составляет примерно 480—550 °С. На графиках термических циклов отмечен резкий спад температуры за первые 2—3 с после достижения максимума. Высокие температурные градиенты и малое время пребывания металла шва при высоких температурах благоприятно сказываются на его структуре. Во многих работах отмечается, что с увеличением частоты вращения инструмента температура в зоне сварки повышается, а с увеличением скорости сварки — понижается.

В работе [13] тепловложение в соединяемые детали при СТП сплава 6N01 системы Al—Si—Mg определяли калориметрическим методом. Для этого детали размещали на медной опорной плите, находящейся в воде, и по повышению температуры воды при MIG-сварке и СТП определяли тепловложение. Установлено, что при скорости сварки 500 мм/мин тепловложение в деталь при MIG-сварке и СТП составляет соответственно 390 и 190 Дж/мин. Ниже приведена таблица, содержащая марки российских

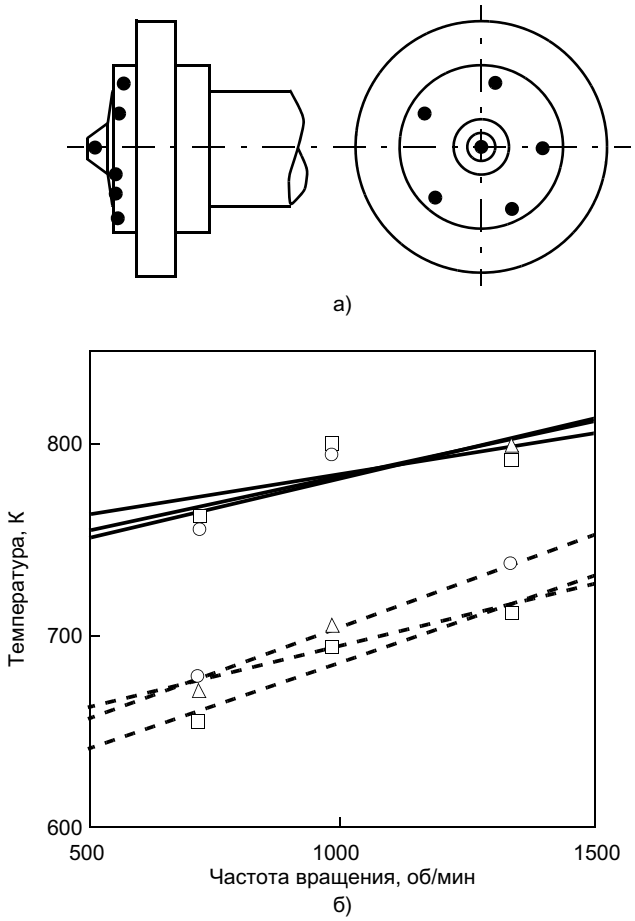


Рис. 3. Схема размещения термопар в инструменте (*а*) и зависимость температуры опорного бурта и технологической подкладки (штриховая линия) от частоты вращения инструмента (сплошная) (*б*) при скорости сварки, равной 30 (○), 50 (△) и 70 (□) мм/мин

Система	Марка сплава	
	США	Россия
Al—Cu—Si—Mn	2014	АК8
Al—Cu—Mg—Mn	2024	D16
Al—Cu—Mg	2095	—
	2195	—
Al—Cu—Mn	2219	1201
Al—Cu—Mg—Mn	2524	—
Al—Mg—Mn	5083	АМг4,5
Al—Mg—Si	6005	АД31
	6061	АД33
Al—Si—Mg—Mn	6082*	АД35
Al—Zn—Cu—Mg	7010**	—
	7050	—
	7075	В95

* Европейская алюминиевая ассоциация (EAA).
** Великобритания.

сплавов, аналогичных по химическому составу зарубежным маркам, рассмотренным в данном обзоре.

Заслуживает внимания сообщение [14] о положительном влиянии пониженной начальной температуры деталей. При сварке предварительно охлажденного до –30 °С алюминиевого сплава 2024 максимальная температура металла в зоне сварки на расстоянии 10 мм от центра шва не превысила 140 °С и структура шва по всему его объему состояла из равноосных зерен величиной до 0,8 мкм, в то время как при начальной температуре деталей 30 °С температурный максимум в той же точке составил 330 °С, а величина зерна в центральной зоне шва — 10 мкм. Этот результат интересен, однако его эффективность необходимо подтвердить повышением механических характеристик соединения. Кроме того, снижение температуры соединяемых деталей должно повлечь за собой необходимость повышения давления (силового параметра) для реализации физико-химических процессов, обеспечивающих образование металлических связей и получение соединения [15]. В работе также не освещено влияние подхолаживания материала на работоспособность инструмента.

Одним из важнейших параметров процесса СТП является давление вращающегося инструмента на разогретый материал, необходимое для формирования соединения. Одновременно с вращением рабочий стержень инструмента, погруженный в массу разогретого материала, продвигается со значительным усилием вдоль стыка, преодолевая сопротивление материала. При этом он испытывает высокотемпературный нагрев и сложное напряженное состояние: кручение и знакопеременный изгиб. Максимальные напряжения от крутящего момента и изгибающих сил приходятся на основание рабочего стержня инструмента. Поэтому возникла необходимость исследования силовых параметров процесса СТП и повышения прочности инструмента.

В работах [12, 16—18] приведены результаты измерения сил, прикладываемых к инструменту и воспринимаемых свариваемыми деталями и оснасткой в процессе сварки, с помощью встроенных в оснастку или головку станка динамометров. Регистрировались усилия в трех направлениях — вдоль, поперек стыка, а также в вертикальном направлении в течение обеих стадий процесса СТП: от начала до окончания погружения вращающегося инструмента в стык и от начала до окончания его перемещения по линии стыка [17, 18]. На основании полученных данных о величине усилий (до 20 кН и более) были определены требования к сборочно-сварочной оснастке. Установлена также взаимосвязь между усилием, действующим на инструмент, и углом отклонения его от вертикали, а также временем остановки инструмента (с продолжающимся вращением) после погружения его в стык.

Во многих работах, сообщающих об исследовании термомеханического цикла при СТП методом моделирования [3, 6, 19—21], отмечается основное требование к оборудованию и оснастке для СТП — обеспечение жесткой фиксации соединяемых кромок и положения инструмента относительно их поверхности (глубины погружения в стык) в течение сварочного цикла. Приводы рабочего перемещения инструмента и его вращения чутко реагируют на любые текущие изменения реактивных сил, действующих на вращающийся инструмент при его погружении в материал и перемещении с вращением сквозь массу разогретого материала по линии стыка. Особенно резко изменяется сопротивление материала продвижению в нем вращающегося инструмента при изменениях глубины его погружения в материал. В работе [20] разработана система адаптивного регулирования глубины погружения инструмента. При малейшем изменении глубины погружения или какого-либо другого параметра соответствующий сигнал передается в обрабатывающий модуль, который фильтрует его, переводит в единый масштаб и передает в компьютер, откуда на функциональный орган поступает команда на корректировку определенного параметра режима сварки.

Экспериментальная разработка системы проведена на вертикально-фрезерном станке Willis CNC, модифицированном для СТП. Усилие и крутящий момент, действующие на инструмент, измеряли с помощью вращающегося динамометра 9124В, встроенного в шпиндельный узел станка. На стадии погружения инструмента (сплав 6061-Т6) осевое

Рис. 4. Изменение усилия на инструменте при погружении в стык и перемещении вдоль стыка

усилие нарастало до значения более 13 кН, а затем снижалось до 4,4 кН на стадии перемещения вдоль стыка (рис. 4). Показано также, как при изменении скорости сварки от 1,7 до 27 мм/с возрастает осевое усилие на второй стадии СТП. В работе [22] также показано, что такая система регулирования способна поддерживать постоянное усилие, действующее на инструмент по всей длине шва. В работе [23] на основании анализа потоков пластического течения материала предлагается использовать для системы регулирования установленную зависимость усилия, действующего на инструмент, от частоты его вращения (по изменению крутящего момента).

Таким образом, во многих разработках силовые параметры использованы в системах управления процессом СТП в качестве интегрального критерия для формирования сигнала управления глубиной погружения инструмента в стык, скоростью сварки и частотой вращения инструмента.

Величина и векторы сил воздействия инструментом на материал, находящийся в пластическом состоянии, определяют направления и скорости движения его потоков, влияя тем самым на формирование структуры соединения. Понимание закономерностей пластического течения в зависимости от конструкции инструмента и параметров режима СТП очень важно, поскольку с ними связана возможность получения плотного, качественного шва.

В работах [5, 8, 19, 23—25 и др.] предложены различные методики исследования пластического течения материала в процессе СТП. В ранних работах [23, 24] была использована техника остановки потока "на месте", дающая лишь примерное представление о перемещении материала, а также методика, основанная на размещении в процессе сборки под СТП стальных шариков диаметром 0,38 мм в канавках торцев соединяемых кромок. Шарики выполняли роль маркеров, наблюдаемых после сварки алюминиевого сплава на рентгенограммах. Эта методика также дает качественную картину массопереноса, а не детализирует процесс пластического течения. То же можно сказать о методике [25], в которой авторы судят о перемещении материала в зоне стыка по перемещению маркеров в виде медных шпилек, размещенных в кромках соединяемых алюминиевых пластин и наблюдаемых с помощью просвечивающей рентгенографии, а также о методике [26], в которой для маркирования применяли медную фольгу, размещенную в стыке между соединяемыми кромками пластин. В работе [27] приведен ряд аналогичных методов исследования для выявления течения материала в зоне, прилегающей к вращающемуся инструменту. При этом в качестве маркера использован композитный материал Al—SiC, который в виде прокладок толщиной 0,6 мм размещали между вертикально установленными пластинами из алюминиевого сплава 7050-T7 толщиной 6,35 мм (рис. 5). Частицы композита SiC микронного размера хорошо видны на непротравленной поверхности шлифов, изготовленных с сохранением в них остановленного "на месте" рабочего стержня инструмента. Показано, что материал перед инструментом перемещается в направлении его вращения, а также из корневых зон в верхние.

В работе [28] в качестве материала маркера использована медная отожженная фольга толщиной 0,1 мм, размещенная в стыке. Для анализа течения материала в процессе СТП построены томографические модели. Для этого с помощью двумерных изображений, получаемых рентгеновским просвечиванием под разными углами (360 ракурсов через 1° относительно оси вращения), строили трехмерную модель, которой можно манипулировать в реальном времени на мониторе компьютера. Однако это не всегда позволяет выявлять детали пластического течения из-за недостаточной разрешающей способности оборудования, а также вследствие разрушения медного маркера вблизи инструмента на мелкие частицы, которые не выявляются при рентгенографии. Поэтому в качестве дополнительного эффективного средства авторы привлекают метал-

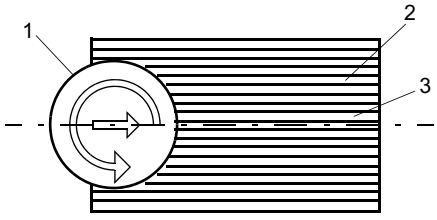
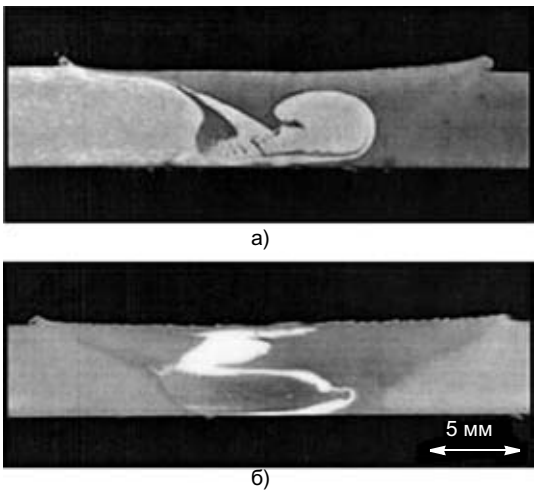


Рис. 5. Схема СТП с поступательным перемещением вращающегося инструмента *1*, погруженного в пакет пластин *2* из сплава 7075 с прокладками *3* из композитного материала Al—SiC (ось инструмента параллельна плоскости пластин)



а)

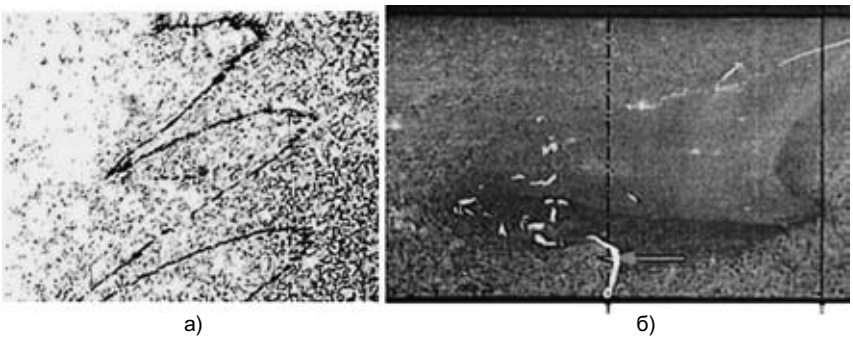
б)

Рис. 6. Макроструктура швов, выполненных СТП алюминиевых сплавов 6082 + 5083 (*а*) и 6082 + 6082 (*б*) со вставкой из сплава 5083

лографию: частицы маркера четко наблюдаются на нетравленых шлифах.

Оригинальные исследования пластического течения при СТП разнородных алюминиевых сплавов приведены в работах [29—32]. Приведенная методика позволяет наблюдать за массопереносом, однако при менее детальном исследовании кинетики процесса пластического течения. В работах [29, 30] отмечено существенное влияние параметров сварки на течение металла и его перемешивание. В работах [31, 32] исследовано формирование соединения разнородных алюминиевых сплавов в результате пластического течения материала с четким изображением участков каждого из сплавов, что обусловлено разной их травимостью (рис. 6). Участки имеют форму, вытянутую в направлении вращения инструмента и, соответственно, в направлении пластического течения материала.

В работе [33] исследовано поведение оксидных частиц при пластическом течении материала в процессе СТП. По мнению авторов, мелкие оксиды, полученные измельчением и перемешиванием поверхностной оксидной пленки, осаждаются на алюминиевых частицах микронного размера, обволакивают их, увеличивая их объем и травимость. Расположение частиц хорошо видно на шлифах, как и при использовании медных маркеров (рис. 7).



а) б)

Рис. 7. Расположение на протравленном шлифе (×250) в горизонтальном сечении СТП—шва частиц оксида (СТП алюминия Al 99,95) [33] (*а*) и меди (СТП сплава 2024-Т3) [28] (*б*)

Авторы работы [28] считают необходимым подбирать материал маркера для исследования каждого сочетания соединяемых материалов. Критерием подбора, по их мнению, может служить минимальное влияние маркера на величину крутящего момента или усилия, определяющую тепловложение в стык при СТП [5]. На приведенных зависимостях (рис. 8) видно, что при использовании в качестве маркера медной фольги толщиной 0,1 мм при СТП сплавов 2024-Т3 + 2024-Т3 (кривая *1*) маркер практически не влияет на термомеханику процесса, в то время как при СТП сплавов 6082-Т6 + 2024-Т3 (кривая *2*) с таким же маркером влияет заметно, снижая достоверность результатов.

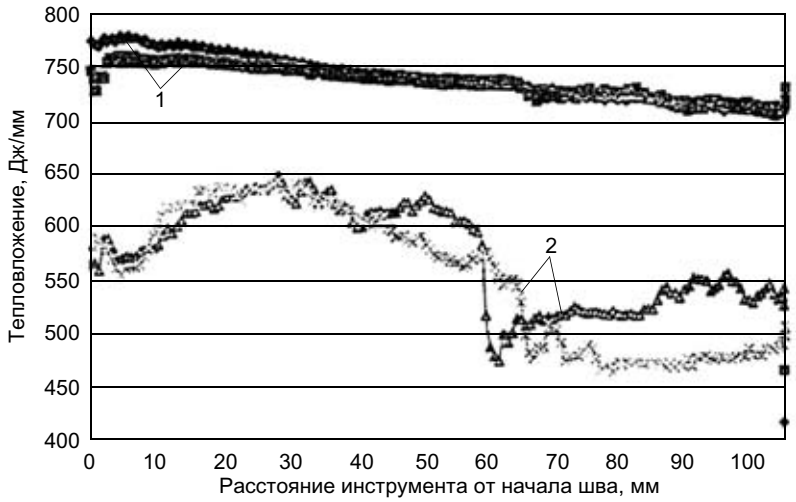


Рис. 8. Зависимость тепловложения в шов от расстояния инструмента от начала шва при СТП (по два образца толщиной 3 мм на каждое сочетание сплавов, маркер расположен в стыке начиная с 65 мм от начала шва и до 105 мм (конец шва))

Приведенные методики исследования пластического течения материала при СТП позволяют наблюдать перемещение материала лишь после окончания процесса

сварки либо прослеживать расположение потоков дискретно, фиксируя текущее положение процесса остановками на "месте". По-видимому, правильнее вести речь о результатах экспериментального исследования не пластического течения, а массопереноса.

Анализ публикаций позволяет представить следующую феноменологическую связь в процессе СТП: режим сварки (частота вращения инструмента, скорость сварки) — термомеханические процессы (температура нагрева, усилия на инструменте) — пластическое течение (тепломассоперенос) — формирование структуры соединения (ядро, зона термического влияния) — свойства соединения (прочность, плотность и др.). Однако не всегда указывается, инструментом какой конструкции выполнялась сварка экспериментальных образцов. Детали конструкции инструмента не учитываются также при моделировании процесса, тогда как конструкция инструмента является параметром, не менее значимым по влиянию на термомеханические процессы, чем параметры режима сварки. Поэтому результаты таких сообщений справедливы лишь для конструкции конкретного инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Штрикман М. М.* Новый способ сварки трением и перспективы его применения (обзор) // Сварочное производство. 2001. № 11. С. 36—41.
2. *Третяк Н. Г.* Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) // Автоматическая сварка. 2002. № 7. С. 12—21.
3. *Heurtier P., Desrayaud C., Montheillet F.* A thermomechanical Analusis of the friction stir welding process // Materials Science Forum (Trans Tech Publications, Switzerland). 2002. Vol. 396—402. P. 1537—1542.
4. *Бровман М. Я.* Основные энергосиловые параметры процесса фрикционного соединения заготовок // Вестник машиностроения. 2002. № 12. С. 12—20.
5. *Dickerson Terry.* Heat flow into friction stir welding tools // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.
6. *Colegrove P., Shercliff H., Threadgill P.* Modelling and Development of the Trivex™ Friction Stir Welding Tool // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.
7. *Nishihara T., Nagasaka Y.* Measurement of tool temperature during friction stir welding // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.
8. *Smith C. B., Bendzsak G. B., North T. H.* Heat and material flow modeling of the friction stir welding process // NJST Special Publication SP. 2002. Vol. 949. P. 475—486.
9. *Song M., Kovacevic R.* A coupled heat transfer model for workpiece and tool in friction stir welding // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.
10. *Kumagai M., Tanaka S.* Application of friction stir welding to welded construction of aluminium alloys // Journal of light metal welding construction. 2001. Vol. 39 (1). P. 22—28.
11. *Служебные* характеристики соединений алюминиевых сплавов 1201 и АМг6, выполненных фрикционной сваркой / В. А. Половцев, М. М. Штрикман, Г. В. Шилло и др. // Сварочное производство. 2005. № 12. С. 8—14.
12. *Enomoto M.* Friction Stir Welding: research and industrial applications // Journal of light metal welding construction. 2002. Vol. 40 (10). P. 59—63.
13. *Aota K.* et al. Heat inputs and mechanical properties in friction stir welding // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan, 2001.
14. *Low-temperature* friction stir welding of 2024 — aluminium / S. Benavides, Y. Li, L. Murr et al. // Scripta Materialia. 1999. Vol. 41. N 8. P. 809—815.
15. *Гельман А. С.* Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970. 312 с.
16. *Schuler V.* FSW — Possibilities and application // Proc. of the int. conf. on the joining of materials. JOM-10. Helsingor — Denmark, 2001. P. 238—257.
17. *Фрикционная* сварка листовых конструкций из алюминиевых сплавов 1201 и АМг6 / М. М. Штрикман, В. А. Половцев, Г. В. Шилло и др. // Сварочное производство. 2004. № 4. С. 41—47.
18. *Johnson R.* Forces in friction stir welding of aluminium alloys // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan, 2001.
19. *Shinoda T.* Effect of tool angle on metal flow phenomenon in friction stir welding // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan, 2001.
20. *Controlling* robotic friction stir welding / G. E. Cook, H. B. Smartt, J. E. Mitchell et al. // Welding Journal. 2003. N 6. P. 28—34.
21. C*hen C., Kovacevic R.* Finite element modeling of thermomechanical performance of friction stir welding // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.
22. *Smith C. B., Hinrichs J. F., Crusan W. A.* Robotic friction stir welding — the state of art // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.
23. *Colligan K.* Material flow in friction stir welding process // Welding Journal. 1999. Vol. 78 (7). P. 229—237.
24. *Colligan K.* Material flow behaviour during friction stir welding of aluminium // 1st International Symposium on Friction Stir Welding. California, USA, 1999.
25. *Rassell M. J.* Development and modeling of friction stir welding // PhD Thesis. University of Cambridge, 2000.
26. *Metal* flow during friction welding / M. Guerra, J. C. McClure, L. E. Murr, A. C. Nunes // TMS. 2001.
27. *Experimental* methods for determining material flow in friction stir welds / B. London, M. Mahoney, W. Bingel et al. // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan, 2001.
28. *Dickerson T., Shercliff H., Schmidt H.* A weld marker technique for flow visualization in friction stir welding // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.
29. *Reynolds A. P., Seidel T., Simonsen M.* Visualization of material flow in an autogenous friction stir weld // 1st International Symposium on Friction Stir Welding. California, USA, 1999.
30. *Visualization* of material flow during friction stir welding of the same and dissimilar aluminium alloys / J. H. Ouyang, R. Kovacevic, Jandric et al. // Proc. 6th International Conference on trends in welding research. Pine Mountain, GA, USA, 2002.
31. *Joining* of dissimilar Al-alloys by friction stir welding / H. Larsson, L. Karlsson, S. Slotz, E.-L. Bergqvist // 2nd International Symposium on Friction Stir Welding. Gothenburg, Sweden, 2000.
32. *Особенности* формирования соединения из разнородных алюминиевых сплавов Д19 и 1420 при фрикционной сварке линейных швов / М. М. Штрикман, А. А. Филатов, А. А. Гельман, Л. Б. Бер // Сварочное производство. 2005. № 1. С. 15—21.
33. *Palm F., Steiger H., Henneboehle U.* The origin of particle (oxide) traces in friction stir welds // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA, 2003.

В. А. АВЕРЧЕНКО, аспирант, С. И. ГОЛОВИН, аспирант, Л. Г. ПОПОВИЧ, канд. экон. наук, А. А. ПУЗРЯКОВ, канд. техн. наук, А. Ф. ПУЗРЯКОВ, д-р техн. наук
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Воздушно-плазменное напыление коррозионно-стойких покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена

Полимеры этилена с молекулярной массой более 1 млн углеродных единиц называются сверхвысокомолекулярным полиэтиленом (СВМПЭ).

Специфические свойства СВМПЭ определяют и особые области его применения. СВМПЭ используют там, где обычный полиэтилен низкого давления и многие другие термопласты не выдерживают жестких условий эксплуатации. Области применения СВМПЭ и потребность в нем непрерывно расширяются. Высокая износостойкость, сопротивление удару, коррозии и воздействию различных химикатов обусловливают широкий диапазон применения СВМПЭ для высокоэффективных, долговечных изделий. СВМПЭ обладает исключительной ударопрочностью даже при криогенных температурах и самым высоким из всех термопластичных полимеров сопротивлением истиранию. Из-за низкого коэффициента трения и высокого коэффициента смазывающей способности он минимизирует теплогенерирующее трение, которое приводит к износу стальных деталей. Изделия из СВМПЭ не требуют смазки, обеспечивая более простое обслуживание, и делают работу оборудования ровной и бесшумной.

В табл. 1 приведены свойства СВМПЭ марок А и Б, в табл. 2 — антикоррозионные свойства (ТУ 2211-153-00203335—2004).

Исключительно высокая коррозионная стойкость в неорганических кислотах (соляной, плавиковой, азотной, серной и их смесях), щелочах, водных растворах неорганических солей, спиртах, сложных эфирах и т. п. позволяет использовать его для антикоррозионных покрытий различных деталей и емкостей.

Благодаря практически нулевому водопоглощению СВМПЭ не происходит изменения размеров при применении его в водных средах, а отсутствие органических пластифицирующих добавок в его составе препятствует возникновению грибка и бактерий.

СВМПЭ во многих случаях может заменять металл (сталь, бронзу и др.) и ряд других материалов, а также такой дорогостоящий полимер, как фторопласт. Кроме того, есть такие области применения СВМПЭ, где он используется не как заменитель, а как единственно пригодный материал.

Наиболее эффективными отраслями-потребителями и областями применения СВПМЭ на внутреннем рынке являются следующие:

— машиностроение: детали бумагокартоноделательных машин, гонки для ткацких станков,

Таблица 1

Свойство	Показатель	
	А	*Б*
Вязкость, мл/г	11—15	15—25
Плотность, кг/м^3, не менее	935—937	
Массовая доля, %:		
золы	0,02—0,10	
летучих веществ	0,10—0,25	
Насыпная плотность, кг/м^3	350—450	
Прочность при разрыве, МПа, не менее	34,2	
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	300,0	
Массовая доля фракции 80—160 мкм порошка СВМПЭ, %, не менее	90,0	
Температура плавления, К	543	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	0,04	
Удельная теплопроводность при 20 °С, Дж/(кг · К)	1420	

Таблица 2

Реагент	Температура, °С		
	20	50	80
Соляная кислота	+	+	+
Серная кислота 50 %/70 %	+/+	+/–	+/–
Щелочи	+	+	+
Хлорная известь	+	+	+
Дизельное топливо	+	+	–
Уайт-спирит	+	–	–
Ацетон	+	+	–
Водные растворы моющих средств	+	+	+

Обозначения. "+" — антикоррозионные свойства обеспечиваются, "–" — нет.

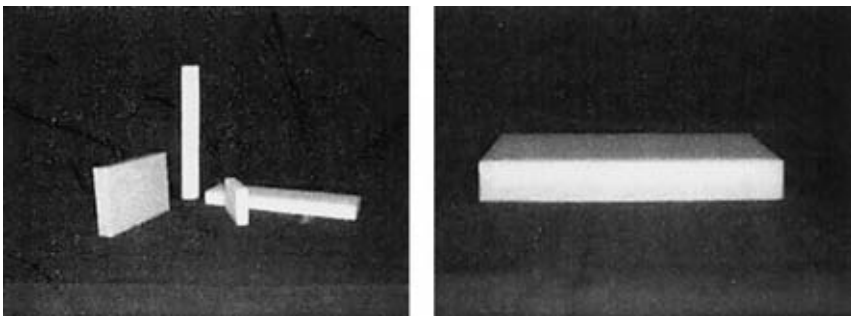


Рис. 1. Монолитные плиты из СВМПЭ

лента для металлорежущих станков, направляющие станков, оборудование для горнорудной промышленности, керамических производств, авиастроения, вагоностроения, сельскохозяйственного машиностроения (прокладки, уплотнители, ролики, валики, вкладыши, втулки, муфты, блоки, винты, подшипники, шестеренки, зубчатые колеса и т. п.);

— химическая промышленность: облицовка и футеровка различных емкостей, машин и аппаратов; изготовление труб и фланцев, лопастей и валов мешалок, поплавков, прокладок и уплотнений (рис. 1), деталей клапанов, сальников и втулок для насосов; уплотнения между стеклянными и металлическими трубопроводами, фильтры для очистки от агрессивных сред, сепарационные материалы, производство ионитных формованных катализаторов;

— подъемно-транспортное оборудование: облицовка ковшей экскаваторов и щитов бульдозеров, направляющие устройства, ленты транспортеров, шнеки, цепные колеса, звездочки, ролики, диски, скребки и др.;

— судостроение: облицовка стен и ворот доков, буферных устройств на судах; система водоснабжения на морских судах;

— строительство: облицовка копров, покрытия дорожных катков, покрытия кузова для груза самосвала, гвозди и др.;

— гальванотехника: ванны, барабаны, валки, направляющие;

— электротехника: изоляторы, опоры, кабелепроводы, детали прерывателей тока, изолирующие детали в диапазоне высоких и сверхвысоких частот, зажимы и оболочки кабелей, контактные вкладыши штепселей, каркасы катодных ячеек, детали оборудования для электронной и часовой промышленности и др.;

— криогенная техника: манжеты, поршневые кольца, прокладки, уплотнения;

— медицина: эндопротезы крупных суставов человека и животных и другие элементы внутреннего протезирования, ортопедические изделия;

— пищевая промышленность: оборудование для кондитерской, хлебобулочной, мясной и молочной промышленности, транспортирующие шнеки для фруктовой пульпы, направляющие и отводные ролики в машинах для заполнения бутылок и наклейки этикеток, разделочные доски для приготовления пищи;

— спортивные товары: полимерные хоккейные катки и ограждения, защитные щитки, полозья саней, покрытия кегельбанов, скользящая поверхность лыж, подкладки под лыжные ботинки, чехлы для коньков, клюшки, каски, лодки, волокна для теннисных ракеток, лески для рыбной ловли;

— текстильная промышленность: сверхпрочные волокна и нити (рис. 2), ремни, канаты, паруса и др.;

— спецтехника: средства бронезащиты (рис. 3).

Наибольший интерес с технической и экономической точек зрения представляют газотермические процессы получения покрытий из СВМПЭ. Характерным для этих способов является отсутствие расплавления материала основы или минимальная степень его оплавления (рис. 4).

Способы газотермического напыления отличаются более высокой производительностью (в 10—1000 раз) по сравнению с другими. Этими методами можно получать покрытия практически из лю-

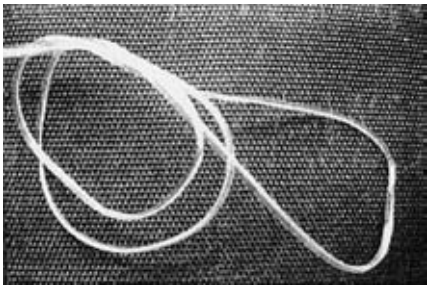
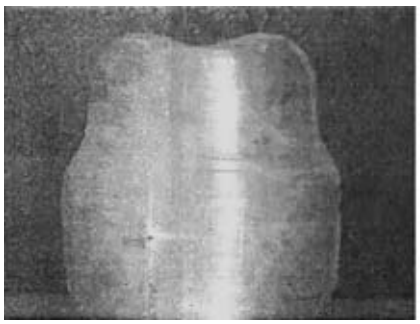


Рис. 2. Нить из СВМПЭ



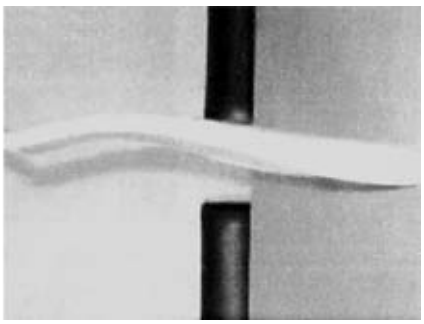


Рис. 3. Элементы бронежилета

Рис. 4. Поверхность, напыленная сверхвысокомолекулярным полиэтиленом

бых материалов толщиной от 10^{-5} до 10^{-2} м и более.

Газопламенное напыление

К преимуществам газопламенного напыления покрытий относятся:

— возможность получения покрытий из большинства материалов, плавящихся при температуре до 2600 К без разложения;

— достаточно высокая производительность процесса (до 3—7 кг/ч порошков самофлюсующихся сплавов) при высоком коэффициенте использования материала (более 85 %);

— относительно низкий уровень шума и световых излучений, позволяющий работать оператору без дополнительных средств защиты;

— легкость и простота обслуживания, невысокие стоимость и мобильность оборудования, что позволяет производить напыление на месте, без демонтажа изделий.

Газокинетический метод

Технология нанесения материала на поверхность деталей и изделий газокинетическим методом свободна от большинства недостатков, присущих другим методам нанесения покрытий, и отличается рядом технологических, экономических и экологических преимуществ:

- покрытие наносится в воздушной атмосфере при нормальном давлении, любых температуре и влажности атмосферного воздуха;
- при нанесении покрытий тепловое воздействие на покрываемое изделие незначительное;
- технология экологически безопасна (отсутствуют высокие температуры, опасные газы и излучения, химически агрессивные отходы, требующие специальной нейтрализации);
- не всегда требуется подогрев покрываемого изделия;
- поток напыляемых частиц является узконаправленным и имеет небольшое поперечное сечение. Это позволяет в отличие от традиционных газотермических методов напыления наносить покрытия на локальные (с четкими границами) участки поверхности изделий;
- возможно нанесение многокомпонентных покрытий с переменным содержанием компонентов по его толщине;
- оборудование отличается компактностью, мобильностью, технически доступно практически для любого промышленного предприятия, может встраиваться в автоматизированные линии, не требуется высококвалифицированный персонал для эксплуатации;
- возможно нанесение покрытий различных типов на одной установке;
- возможно использование оборудования в полевых условиях.

Плазменный метод

Метод плазменного напыления покрытий вначале нашел широкое применение в изделиях специальной техники. В последнее время метод с высокими технико-экономическими показателями применяется в машиностроении, энергетике, химической, нефтегазовой, дорожно-строительной, сельскохозяйственной технике, а также на предприятиях городского и коммунального хозяйства.

Характерным отличием плазменного напыления от газопламенного являются более высокие температура плазменной струи и скорость полета частиц. Эти особенности позволяют регулировать свойства покрытий в широких диапазонах и в значительной степени избежать недостатков, присущих газопламенному методу напыления. Например, прочность сцепления плазменных покрытий из порошка стали в 3 раза больше, чем газопламенных. Методы нанесения покрытий и их основные технологические и экономические показатели приведены в табл. 3.

Таблица 3

Метод	Температура струи (дуги), К	Скорость струи, м/с	Скорость напыляемых частиц, м/с	Прочность сцепления, МПа	Стоимость энергозатрат, руб/м^2
Газопламенное напыление	2400—2800	30—160	30—50	10—25	36,0
Детонационное напыление	2400—2800	2700—2950	700—850	75—100	120,0
Плазменное напыление:					
Ar—N_2	6000—20 000	800—1400	40—120	20—80	14,7
воздух	3000—12 000	200—1500	40—250	15—100	5,7
Сверхзвуковое газопламенное напыление	2400—2800	2000—3000	500—750	>80	144,0
Сверхзвуковое плазменное напыление (воздух)	2500—12 000	1500—3000	450—800	>80	22,8

Эффективным способом улучшения коррозионной стойкости поверхностей деталей является нанесение покрытий из СВМПЭ методом плазменного напыления.

Для наблюдения за развитием коррозионных процессов на поверхностях контрольных образцов наносили Х-образные искусственные очаги коррозии. При визуальном осмотре образцов установлено, что внешний вид контрольных образцов и состояние покрытия из СВМПЭ перед испытанием в целом удовлетворительны. В процессе испытания каждый образец подвергался воздействию определенной агрессивной химической среды.

Основные свойства применяемых агрессивных компонентов приведены в табл. 4—6.

Испытания проводили в коррозионной камере НИИЦИАМТ. Подготовленные группы контрольных образцов устанавливали вдоль стен коррозионной камеры на расстоянии не менее 3 м друг от друга. В процессе испытаний образцы подвергали циклическому воздействию агрессивной среды, создаваемой в камере. Продолжительность цикла соответствовала полным суткам испытаний.

Каждый цикл состоял из двух частей. В первой части цикла в камере устанавливается и поддерживается температура воздуха 37 ± 3 °С и относительная влажность 80—90 %. По истечении каждого часа в зонах установки образцов в течение 15 мин распыляется раствор соответствующего компонента (см. табл. 4—6).

Во второй части цикла испытаний камеру с образцами охлаждали естественным путем.

По заключению лаборатории коррозионных испытаний НИИЦИАМТ, после 15 циклов испытаний отмечен налет коррозии на образцах в зонах искусственных очагов коррозии. В целом коррозионная стойкость защитного покрытия по результатам испытаний оценивается как удовлетворительная.

Использование СВМПЭ повышает также эффективность металлополимерных покрытий при производстве подшипников скольжения, когда металлическая матрица несет силовую нагрузку, а СВМПЭ выполняет роль антифрикционного наполнителя.

Опыт разработки составов композиций и применения композиционных полимерных покрытий свидетельствует о том, что введение в состав композиций материалов, содержащих металлоплакирующий состав, обеспечивает в процессе трения формирование защитной сервовитной пленки (от лат. servo-witte — спасать жизнь). К таким материалам

Таблица 4

Свойства нефти с Тавельского месторождения (2 пробы)	Значение
Плотность нефти, кг/м^3	896,0
Плотность пластовой воды, кг/м^3	1093,0
Содержание, %:	
воды	5,40
серы	2,83
парафина	1,60
асфальтенов	7,87
смол	13,95

Таблица 5

Свойства	Этаноламин		
	Моноэтаноламин	Диэтаноламин	Триэтаноламин
Агрегатное состояние	Горючая жидкость		
Плотность, кг/м^3	1009,8	1087,0	1027,0
Температура кипения, °С	172,2	270	360
Температура плавления (затвердевания), °С	10,5	28,0	21,0
Вязкость, Па•с	24,1	380	1043
Растворимость в воде	Неограниченная	Неограниченная	Нерастворим
Температура вспышки, °С	93	151	232
Температура самовоспламенения, °С	410	405	395
Температура налива в железнодорожные вагоны-цистерны, °С		40—80	

Таблица 6

Свойства	Гликоль		
	Этиленгликоль	Диэтиленгликоль	Триэтиленгликоль
Агрегатное состояние	Горючая жидкость		
Плотность, кг/м^3	1114,0	1116,0	1122,0
Температура кипения, °С	197,6	245	291
Температура замерзания, °С	–15,0	–8	–7,2
Температура самовоспламенения, °С	380	343	371
Температура воспламенения, °С	118,3	132	170
Температура вспышки, °С	120	124	154
Вязкость при 20 °С, Па · с	20,93	35,70	47,80
Растворимость в воде	Неограниченная		
Температура налива в железнодорожные вагоны-цистерны, °С	40—80		

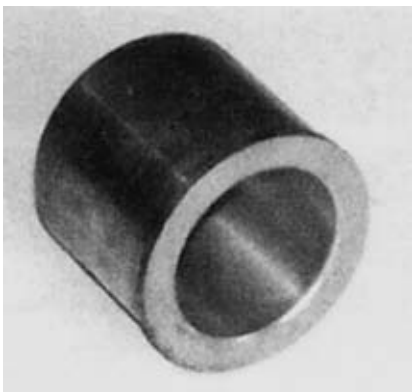


Рис. 5. Подшипник скольжения (бронза + + СВМПЭ)

относятся комплексные соединения меди, способствующие улучшению эксплуатационных свойств узла трения. Известно, что улучшить триботехнические, физико-механические свойства покрытия можно за счет эффекта "безызносности". Этот эффект обеспечивается благодаря образованию в зоне фрикционного контакта соединений меди с продуктами деструкции полимеров. Механизм смазывающего действия связан с образованием пленок переноса на сопряженных поверхностях.

На рис. 5 приведен подшипник скольжения с металлополимерным покрытием. Металлополимерные покрытия в подшипниках скольжения имеют коэффициент трения $f_{тр} \approx 0{,}010 \div 0{,}036$. Поскольку основу покрытия составляет металлическая матрица, механическая прочность металлополимерного покрытия высокая.

Разработанные технологические процессы применены для плазменного напыления антикоррозионных покрытий из СВМПЭ на элементы нефтегазового и химического оборудования, а также в производстве тяжелонагруженных подшипников скольжения.

Г. Б. ЕРМОЛАЕВА, инж., Э. А. КУЗНЕЦОВ, инж.
ОАО "ГАЗ" (Нижний Новгород)

Расширение возможностей декоративной отделки деталей в черный цвет

Область применения электрохимического чернения в растворе композиции НН-1, применяемого в гальванической практике в течение пяти лет, в последнее время значительно расширилась. Если начиная с 2000 г. его применяли в основном для отделки инструмента и оснастки (резцедержателей, метчиков, фрез, скоб, калибров, шильдиков), то с 2005 г. стали применять для отделки деталей автомобиля (например рычага стояночного тормоза "Волги"), обработки пружин, чернения деталей газовой промышленности, техники специального назначения, деталей приборостроения.

В настоящее время электрохимическое чернение внедрено на десяти предприятиях, можно с уверенностью сказать, что его применение обеспечило эффективную и экономически выгодную замену процессу высокотемпературного щелочного оксидирования, а также решило ряд других задач. Расширение области применения процесса чернения обусловлено его простотой. Качественные черные покрытия образуются за короткое время (в среднем 5—15 мин) в холодном растворе на катоде при плотности тока 0,2—2,0 А/дм^2. Раствор для чернения стабилен в эксплуатации (может без потери свойств храниться в течение нескольких месяцев), готовится и корректируется с помощью единственного компонента — композиции чернения НН-1 (ТУ 2149-001-77816249—2005, изготовитель ООО "Гальванические технологии", Нижний Новгород). Необходим лишь ежедневный контроль кислотности и поддержание pH на уровне 8,0—9,5 путем добавки раствора едкого натра. Используемые для чернения графитовые аноды в процессе работы не изнашиваются, имеют неограниченный срок службы, не требуют частой очистки (достаточно проводить периодическую мойку капроновыми щетками под струей воды). В состав раствора чернения не входят вредные или ядовитые вещества, при его эксплуатации должны соблюдаться общие правила безопасности. Ванна должна быть оборудована вытяжной вентиляцией, сточные воды направляются в общие кислотно-щелочные стоки на станцию нейтрализации.

Покрытия равномерного черного цвета формируются на всех участках любой сложно профилированной поверхности. При обеспечении качественной очистки деталей путем обезжиривания и травления достигается высокая прочность сцепления покрытий — они не мажутся и не стираются как в мокром, так и сухом состояниях. В одной ванне можно чернить различные токопроводящие материалы (сталь, чугун, медные сплавы, алюминий и другие металлы). Дополнительная обработка покрытий в маслах или эмульсиях повышает их защитную способность, а в отдельных случаях и придает деталям блеск.

В ОАО "ГАЗ" (Нижний Новгород) автомобильные детали обрабатывают в ванне объемом 1,3 м^3 с единовременной загрузкой деталей площадью 65 дм^2. Концентрация раствора чернения 200 г/л композиции НН-1. В раствор вводится 2—6 г/л едкого натра до достижения pH = 8,0÷9,5. Температура раствора 18—30 °С, катодная плотность тока 0,5 А/дм^2, продолжительность обработки до 15 мин. Чистка графитовых анодов осуществляется раз в 3 мес. во время чистки ванны. Претензии по качеству черных покрытий за год эксплуатации ванны отсутствуют.

Простота и надежность процесса электрохимического чернения обусловливают дальнейшее расширение области его применения для разнообразных целей.

В. Д. МАКАРЕНКО, д-р техн. наук
(Нижневартовский филиал ТюмГНГУ),
С. И. ГОРБУНОВ, инж., В. В. ОГОРОДНИКОВ, д-р техн. наук,
Р. Б. БАКЕЕВ, канд. техн. наук
(ОАО "ТНК – ВР", Нижневартовск),
В. Л. ШЕВЦОВ, д-р техн. наук
(ИЭС им. Е. О. Патона)

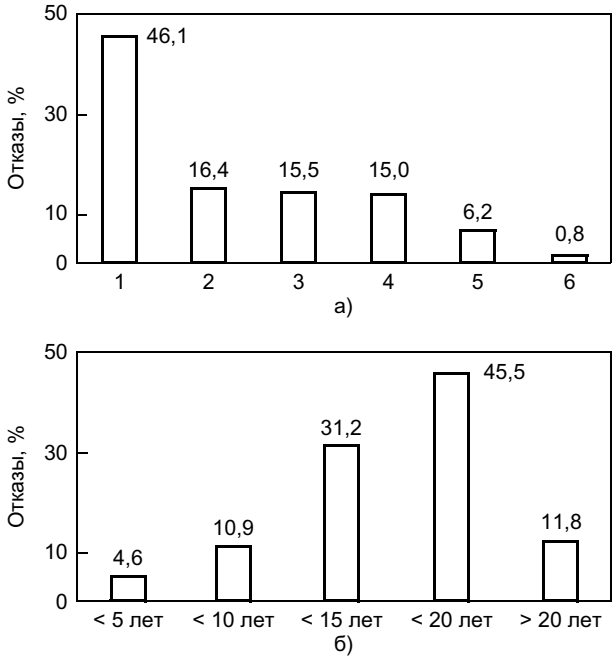
Причины отказов технологического оборудования газоперерабатывающих заводов Западной Сибири

В процессе работы технологическое оборудование газоперерабатывающих заводов (ГПЗ), эксплуатируемое в условиях низких температур воздуха (до 60 °С) и повышенного давления (до 10 МПа), подвергается длительному воздействию агрессивной среды, что приводит к развитию коррозионных процессов. Поэтому определение причин аварийных отказов в таких сложных системах имеет приоритетное значение вследствие экологической опасности для окружающей среды. Большое значение этой проблеме уделяется в последние годы, что связано с длительной (более 25—30 лет) эксплуатацией оборудования и трубопроводов.

Авторы настоящей работы совместно со специалистами Нижневартовского и Белозерного ГПЗ на протяжении многих лет проводили сбор данных об отказах и аварийных остановках оборудования, их систематизацию, анализ причин и характеристик отказов.

Элементы технологической системы добычи, транспорта и переработки попутного нефтяного газа включают насосно-компрессорные трубы (НКТ), муфты НКТ, обсадные трубы, соединительные и технологические трубопроводы, запорно-регулирующую и предохранительную арматуру, аппараты комплексной подготовки газа (УКПГ), аппараты ГПЗ, детали аппаратов. Характеристики отказов включают причину отказа, срок эксплуатации, время отказа и ввода в эксплуатацию, объект исследования. За период с 1985 по 2005 гг. собраны данные о более 1200 отказах оборудования и аварийных остановках.

В процессе анализа полученных данных установлено, что основными причинами (рис. 1, *а*) отказов являются язвенная коррозия (46,1 % от общего



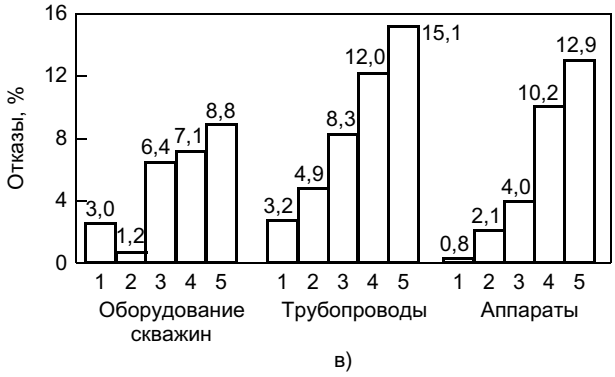


Рис. 1. Отказы оборудования за период работы 1980—2003 гг. (*а* — причины отказов: язвенная коррозия (*1*); водородные расслоения (*2*); механические повреждения (*3*); сероводородное растрескивание (*4*); потеря герметичности (*5*); газовая и почвенная коррозия (*6*); *б* — периоды эксплуатации; *в* — виды оборудования, эксплуатировавшегося в течение до 5 (*1*), 10 (*2*), 15 (*3*), 20 (*4*) и более 20 (*5*) лет)

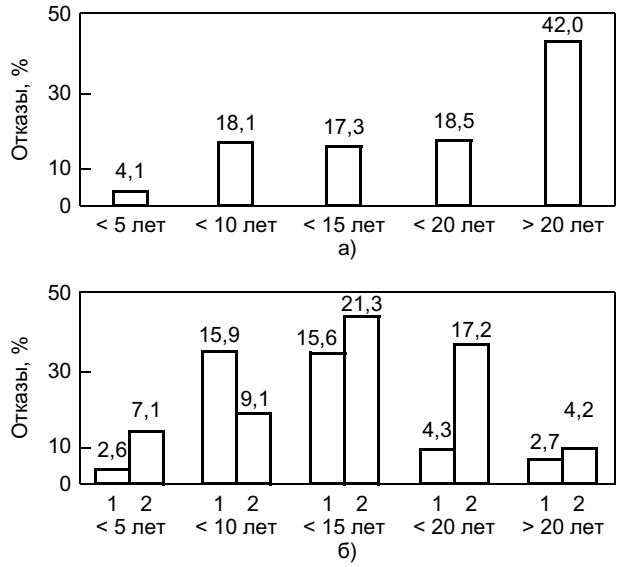


Рис. 2. Отказ оборудования из-за сероводородного растрескивания (*а*) и механических повреждений (*б*): *1* — механические повреждения; *2* — потеря герметичности

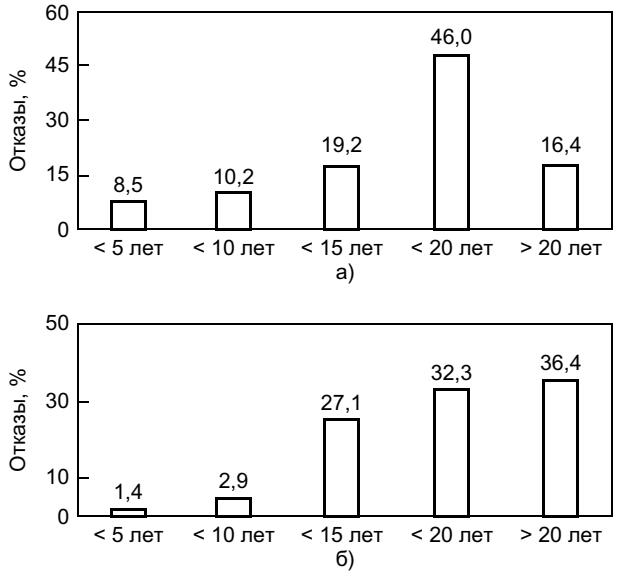


Рис. 3. Отказ оборудования из-за язвенной коррозии (*а*) и водородного расслоения (*б*)

числа отказов), водородное расслоение (16,4 %) и сероводородное растрескивание (15,0 %). Механические повреждения (засорение межтрубного пространства солями, деформация изделия, износ резьбы, разрыв штоков, разрушение подшипников и соединительных муфт и т. д.) составляют 15,5 %, а отказы из-за потери герметичности не превышают 6,2 %. Отказы оборудования, вызванные газовой и почвенной коррозией, составляют не более 0,6 %. Следовательно, отказы вследствие коррозии металлического оборудования составляют 61,9 % общего числа отказов.

Распределение отказов по периодам эксплуатации (рис. 1, *б*) и видам оборудования (рис. 1, *в*) показывает, что после работы в течение 10 и более лет среднегодовое число отказов резко увеличивается. Их причинами являются повреждения НКТ и их муфт, а также большой объем вырезок дефектных участков соединительных трубопроводов (ТП), обнаруженных внутритрубной ультразвуковой дефектоскопией. В этой связи необходимо совершенствовать существующие методики оценки потенциальной опасности дефектов, что позволит резко уменьшить число таких вырезок.

В процессе анализа данных, приведенных на рис. 2—5, установлено следующее.

После 10—15 лет эксплуатации аппаратов УКПГ в металле большинства из них обнаруживаются инициируемые водородом расслоения, что вызывает необходимость их замены. В этот же период эксплуатации установлена также повышенная частота отказов деталей аппаратов УКПГ и ГПЗ. Снижение числа отказов оборудования и ТП следует связывать с использованием эффективного ингибирования, своевременным контролем коррозионного состояния и выполнением планово-предупредительных работ.

Из данных, приведенных на рис. 2, 3, вытекают следующие закономерности. Доля отказов, вызванных язвенной коррозией, водородным расслоением, механическими повреждениями и потерей герметичности с увеличением срока эксплуатации ГПЗ возрастает. Причем количество отказов из-за сероводородного растрескивания максимально после 20 и более лет эксплуатации, минимально — в первые годы эксплуатации, а в период 10—20 лет устанавливается на примерно постоянном уровне. С увеличением срока эксплуатации (свыше 10 лет) резко возрастает количество отказов по причине водородного расслоения (см. рис. 3, *б*).

Анализ причин отказов применительно к виду оборудования (см. рис. 4, 5) показывает, что язвенная коррозия является основной причиной потери работоспособности НКТ, аппаратов ГПЗ и деталей аппаратов УКПГ, метанопроводов, шлейфовых ТП и ТП факельных линий. Сероводородное растрескивание — основная причина аварийных отказов муфт НКТ и деталей ТП. Водородное расслоение приводит к отказам аппаратов УКПГ и соединительных ТП. Кроме того, из полученных данных следует, что водородные расслоения и сероводородное растрескивание металлоконструкций на-

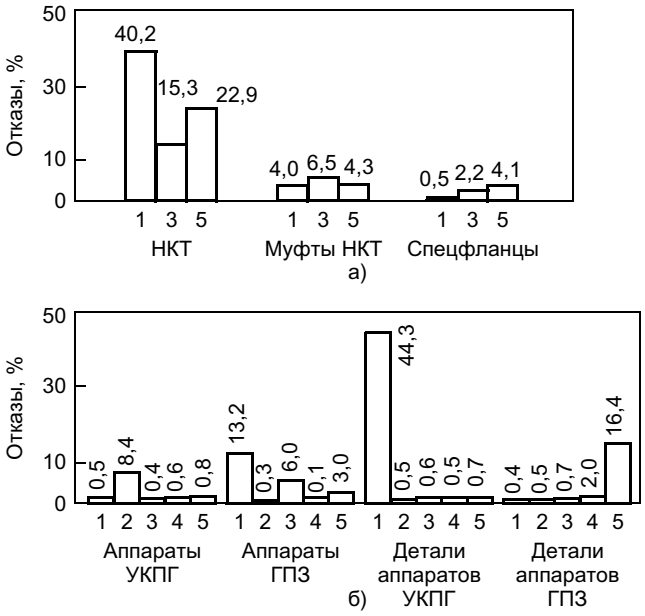


Рис. 4. Отказ оборудования скважин (*а*) и аппаратов и их деталей (*б*): *1* — язвенная коррозия; *2* — водородное расслоение; *3* — сероводородное растрескивание; *4* — потеря герметичности; *5* — механические повреждения

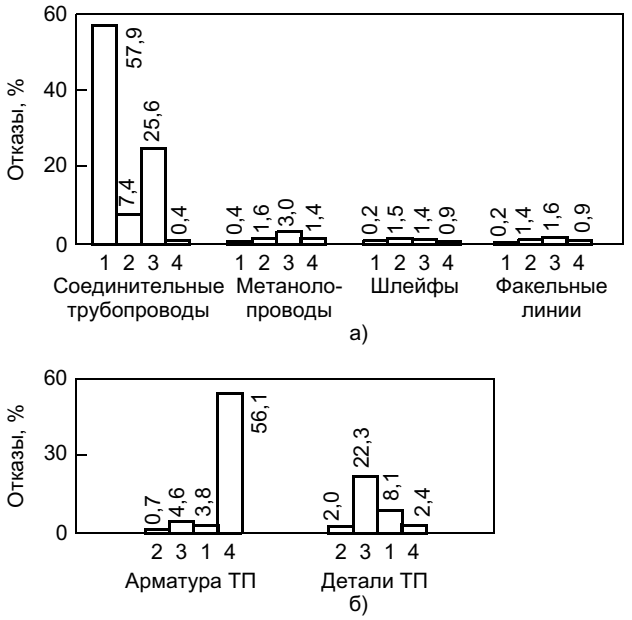


Рис. 5. Отказ оборудования трубопроводов (*а*), арматуры и деталей трубопроводов (*б*): *1* — язвенная коррозия; *2* — водородное расслоение; *3* — сероводородное растрескивание; *4* — механические повреждения

блюдаются, как правило, в сочетании с язвенной коррозией металла. В то же время механические повреждения, хотя и не являются основной причиной отказов, могут привести к разрушению скважинного оборудования, запорно-регулирующей арматуры и деталей ТП, а также деталей оборудования ГПЗ.

Системный анализ статистических данных об отказах оборудования за многолетний период их эксплуатации показывает, что оборудование ГПЗ находится в состоянии, соответствующем требованиям руководящих документов к таким объектам. Однако на многих объектах наблюдается режим интенсивного коррозионно-механического износа отдельных участков оборудования и ТП.

Металлографические исследования, выполненные с помощью электронного микроскопа JSM-35, показали, что металл стенок оборудования и ТП подвержен водородной деградации, которая резко снижает вязкопластические и коррозионно-стойкие свойства. На микрофотографиях поверхностей поперечного сечения стенок оборудования ГПЗ и соединительных ТП видны очаги локальной коррозии. Проникая на 50—100 мкм вглубь металла, они образуют узкие места и длинные каналы, которые могут сливаться, полностью опоясывая зерна металла. Это приводит к "разрыхлению" структуры, что вызывает снижение сопротивления металла хрупкому разрушению.

В процессе длительной эксплуатации (более 10 лет) стали при 50—100 °С существенно изменяется состав поверхностного слоя, контактирующего с коррозионно-активными продуктами (рис. 6). Толщина слоя измененного состава составляет около 60—70 мкм. Согласно данным о составе коррозионных отложений, поверхностный слой обогащен углеродом и серой и обеднен железом. Максимальная концентрация углерода и серы наблюдается в непосредственной близости от поверхности и составляет соответственно 32—35 и 20—25 %. Содержание железа в приповерхностной области металла составляет 40—45 %. По мере удаления от поверхности в металле возрастает

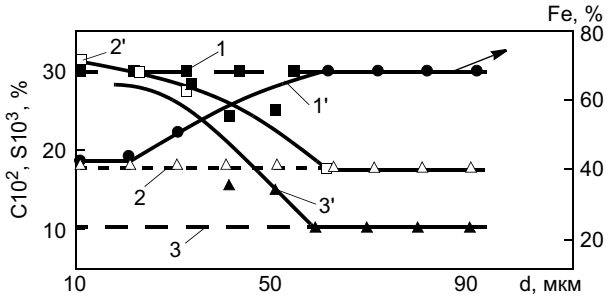


Рис. 6. Содержание в поверхностном слое коррозионных язв стенок МКТ железа (*1*, *1'*), углерода (*2*, *2'*) и серы (*3*, *3'*) в исходном состоянии (*1—3*) и после их длительной эксплуатации (*1'—3'*)

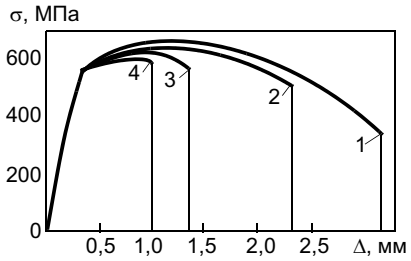


Рис. 7. Зависимость напряжения металла от деформаций в нем для фрагментов, вырезаемых из аппаратов ГПЗ, во время испытаний в коррозионной среде NACE: *1—4* — срок эксплуатации до 5, 10, 15 и 20 лет соответствен**но**

содержание железа и уменьшается содержание углерода и серы, достигая на глубине около 60—70 мкм среднего уровня в объеме металла. Как известно из литературы и практики, сплавы состава, подобного образовавшемуся в приповерхностной области стали после ее длительной эксплуатации, отличаются большой склонностью к питтинговой коррозии.

Механические испытания образцов, изготовленных из аппаратов ГПЗ, показали, что с увеличением сроков эксплуатации происходит охрупчивание металла, проявляющееся в снижении сопротивления хрупкому разрушению (рис. 7). Полученные результаты подтверждают возможность наводороживания металла стенок аппаратов ГПЗ и свидетельствуют о важной роли водорода в деградации сталей.

Таким образом, в процессе исследований установлены закономерности распределения во времени отказов оборудования и ТП: число отказов вследствие язвенной коррозии, механических повреждений, потери герметичности и водородных расслоений возрастает с увеличением срока эксплуатации; число отказов из-за сероводородного растрескивания максимально в первые 5 лет эксплуатации оборудования ГПЗ, а затем, снижаясь, устанавливается на примерно постоянном уровне. По процентному соотношению основных причин отказа различных видов оборудования выявлена превалирующая роль локальной (питтинговой) коррозии в потере работоспособности НКТ, аппаратов ГПЗ и деталей аппаратов УКПГ.

На основе обобщения и систематизации причин, условий и факторов, вызывающих аварийные отказы, разработан комплекс мероприятий по повышению надежности оборудования и трубопроводов ГПЗ. Их основу составляют эффективное ингибирование, применение прогрессивных коррозионно-стойких материалов, изменение условий эксплуатации, проведение своевременного технического диагностирования и планово-предупредительных работ.

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.

А. Ю. НЕДЕЛЬКО, инж.
ОАО «НПП "Эталон"» (Омск)

Использование оптоволокна в оптической системе пирометров

В настоящее время оптическое волокно широко применяют в различных областях: в системах связи для передачи потока цифровой информации посредством модулированного оптического излучения, в измерительных системах в качестве линии передачи, а также непосредственно чувствительного элемента.

Использование оптоволокна в качестве непосредственно датчика в ОАО «НПП "Эталон"» находится на стадии изучения, а оптоволоконные элементы в пирометрах применяют для передачи потока измеряемого теплового излучения от объекта на датчик, а также излучения видимой подсветки области измерения на объект.

Некоторые достоинства оптических волокон:

— малые потери (минимальные 0,154 дБ/км), диаметр и масса;

— эластичность (малый допускаемый радиус изгиба);

— механическая прочность (выдерживает нагрузку на разрыв примерно 70 Н);

— отсутствие взаимной интерференции (проникновение сигнала в соседние линии);

— безындукционность (практически отсутствует влияние электромагнитной индукции, а следовательно, и отрицательные явления, связанные с близостью к линии электропередачи, импульсами тока в силовой цепи и т. п.);

— взрывобезопасность;

— высокая коррозионная стойкость, особенно к химическим растворителям, маслам, воде.

Рассмотрим конструкцию оптического волокна, а также основные принципы и понятия, применяемые в оптоволоконной технике.

Волоконным световодом называют оптически прозрачную (в заданной спектральной области) нитевидную структуру, содержащую как минимум сердцевину и коаксиальную ей оболочку, показатель преломления n_0 которой меньше, чем у сердцевины n_c. В качестве материала световода обычно применяют кварцевое стекло ($n \approx 1{,}5$), легированное различными примесями, или оптически прозрачные полимеры. Снаружи волоконный световод может быть покрыт защитной оболочкой, которая обычно не влияет на его оптические свойства.

Для передачи излучения по оптоволокну необходимо оптическое сопряжение источника излучения с одним из торцев световода. При этом в оптоволокне могут распространяться только лучи, для которых угол падения на оболочку не превышает угла полного внутреннего отражения, т. е. выполняется условие

$$\cos\theta \geqslant n_0/n_c. \qquad (1)$$

Максимально допустимый угол ввода света в световод (по отношению к оси световода) получил название апертурного угла ввода, синус данного угла называется числовой апертурой световода, которую вычисляют по формуле

$$NA = \sin\theta_{max} = \sqrt{n_c^2 - n_0^2}, \qquad (2)$$

где θ_{max} — апертурный угол ввода света в оптоволокно.

Таким образом, в оптическом волокне будет распространяться световой пучок, падающий на торец световода под углом, не большим θ_{max}, и диаметром не больше диаметра сердцевины. Однако и в этом случае неизбежны потери на входе в световод в связи с отражением излучения от его торца.

Оптические лучи внутри волокна распространяются, многократно испытывая полное отражение. Но распространение этих лучей возможно лишь в том случае, когда они проходят под определенным углом. При попадании света от внешнего источника на торец световода в нем возбуждается несколько волн (лучей), которые распространяются по световоду независимо от исходного луча. Возможные (разрешенные) собственные световые волны, которые распространяются в оптоволокне, называют модами. По сути, модой можно также назвать возможную траекторию прохождения светового луча по оптоволокну.

Оптоволокно, в котором в идеальном случае может существовать только одна мода (луч), называют одномодовое волокно (рис. 1, *а*). Такой эффект достигается за счет использования лазеров и сердцевины оптоволокна диаметром, соизмеримым с длиной волны ($d/\lambda < 10$) — для одномодового волокна диаметр сердцевины 8—10 мкм.

В многомодовом волокне (рис. 1, *б*) вследствие сравнительно большого диаметра сердцевины и использования некогерентных источников излучения возможно существование большого количест-

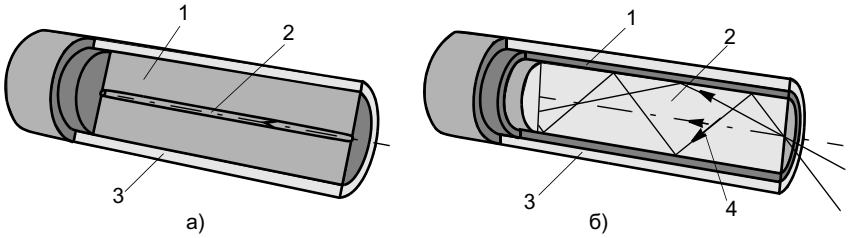


Рис. 1. Одно- (*а*) и многомодовое (*б*) волокна: *1* — оболочка; *2* — сердцевина; *3* — защитная оболочка; *4* — мода самого высокого порядка

ва мод. Промышленные многомодовые световоды имеют сердцевины диаметром 50 или 62,5 мкм, внешний диаметр оболочки световода в обоих случаях составляет 125 мкм.

При передаче аналогового сигнала немаловажным является тот факт, что моды высоких порядков (входящие в волокно под большими углами) значительно затухают при изгибах волокна. Следовательно, для уменьшения погрешностей при изгибах волокна следует либо использовать одномодовое волокно, либо заведомо не допускать попадания в волокно мод высоких порядков.

При распространении излучения в волокне также возникают потери, связанные с его поглощением и рассеянием. Величина потерь при распространении излучения

$$k = -10\frac{1}{L}\lg\left(\frac{I_{вых}}{I_{вх}}\right), \qquad (3)$$

где $I_{вх}$, $I_{вых}$ — интенсивности излучения соответственно на входном и выходном концах световода; L — длина световода.

Реальная результирующая кривая затухания (рис. 2) отличается от теоретической, что связано с химическим составом материала оптоволокна (прежде всего с примесями) и приводит к ухудшению его прозрачности на определенных длинах волн.

Участки спектра, на которых достигаются минимальные значения затухания, получили название окон прозрачности. В современной волоконно-оптической технике для передачи информации используются три основных окна прозрачности: 1-е окно — в области 850 нм; 2-е окно — 1270 (1280) — 1325 нм; 3-е окно — 1528—1565 нм.

Большинство систем связи работают на длине волны 1,55 мкм, где ослабление сигнала в кварцевом волокне минимально. Логично выбрать фотодиод с максимумом чувствительности на этой длине волны, что, впрочем, при длине волокна менее 10 м не критично. Если наложить кривые спектральных характеристик оптоволокна и фотодиода, то видно, что рабочая область фотодиода попадает в полосу с минимальными потерями (рис. 3).

Тип оптоволокна выбирали с учетом его термостойкости, возможности передачи достаточной мощности потока излучения на датчик и воспроизводимости при изгибе кабеля.

От наиболее доступных стандартных оптических волокон, применяемых для связи, с пластиковыми оболочками пришлось отказаться, так как рабочий температурный диапазон для них ограничен — 70—80 °С. Но в нормальных условиях макет с кабелем из пластикового волокна работал вполне удовлетворительно.

Оптическое волокно с сердцевиной и оболочкой из кварцевого стекла может выдерживать эксплуатацию при температуре до 600 °С и более стойко

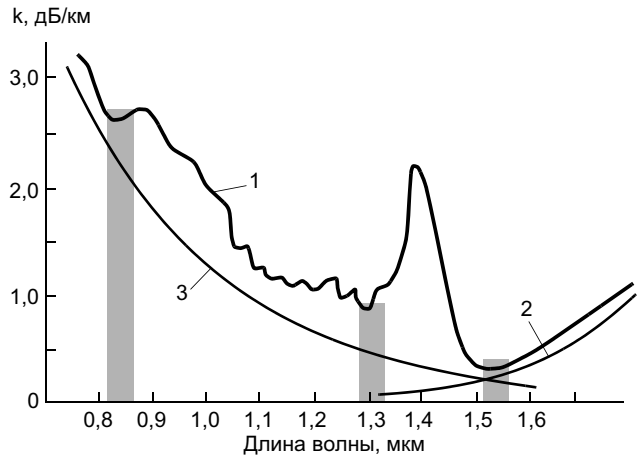


Рис. 2. Затухание в оптоволокне: *1* — реальное затухание; *2*, *3* — соответственно кривые поглощения и рассеивания

Рис. 3. Спектральные характеристики оптоволокна (*1*) и фотодиода (*2*)

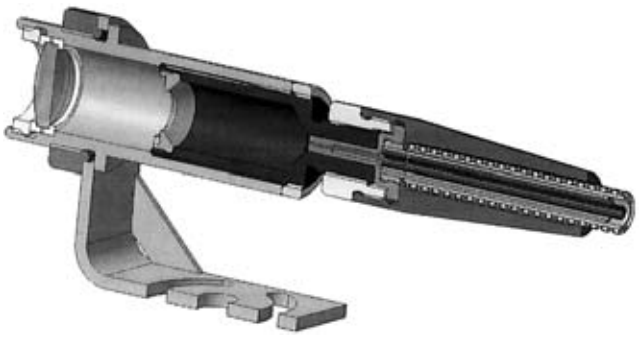


Рис. 4. Приемная головка

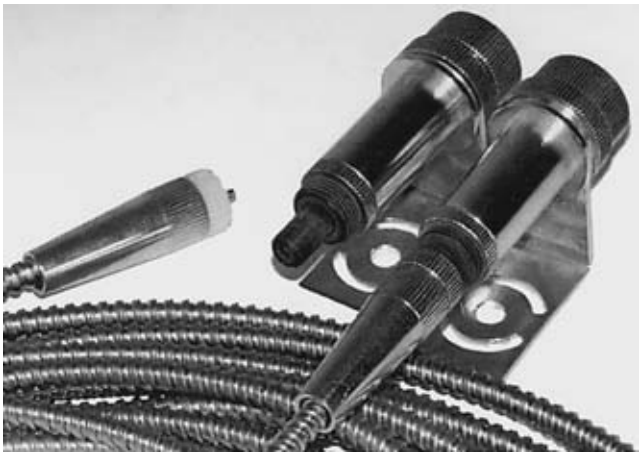


Рис. 5. Оптоволоконный кабель с оптической головкой

против механических деформаций. С учетом площади приемных площадок фотодиодов и технологических возможностей оборудования изготовили кабель с оптоволокном из кварцевого стекла, диаметр кварцевой сердцевины 500 мкм. С волокном такого диаметра легко работать, и чувствительность по уровню шумов позволяла измерять температуры с 250 °С. Но при испытаниях на изгиб уровень сигнала изменялся на 3—5 % из-за ослабления мод высоких порядков. Следовало не допускать моды высоких порядков на входе в оптоволокно. В конструкцию оптической приемной головки установили апертурную диафрагму, которая ограничивала моды высоких порядков. В результате зависимость от изгиба кабеля снизилась до 0,1 %. Оптическая головка с подключенным оптоволоконным кабелем приведена на рис. 4.

В качестве внешней защитной оболочки применяют металлорукав из коррозионно-стойкой стали с внешним диаметром 6 мм, но наличие фторопластовых деталей в конструкции ограничивает температуру эксплуатации до 150 °С. Со стороны, подключаемой к пирометру, кабель притягивается фторопластовой гайкой, а в пирометре установлена эбонитовая втулка, таким образом кабель надежно изолирован от прибора (рис. 5). Длина кабеля ограничивается только технологией сборки и в настоящий момент его можно изготовлять длиной до 10 м.

Для приклейки волокна к коннектору используют клей на основе эпоксидной смолы. Для шлифовки торца волокна необходима металлическая оправка (рис. 6), ровная полированная металлическая или стеклянная пластина и полировочная шкурка. Момент окончательной готовности определяют при помощи микроскопа, иначе дефекты обработки торца оптоволокна не видны. Отсутствие повреждений волокна в кабеле проверяют путем просвечивания с помощью лазера или лампы. Дополнительно определяют влияние изгиба путем накручивания кабеля на оправку радиусом, равным минимально допустимому радиусу изгиба кабеля.

В пирометре ПД-7 подсветку области измерения осуществляют путем подключения кабеля к разъему "Лазер", что не совсем удобно. После наведения оптической головки в требуемое место кронштейн фиксируется затяжкой винтов и кабель подключается к разъему "Сигнал". Неиспользуемые оптические разъемы закрываются защитными колпачками.

Следующим этапом стало объединение возможности измерений и подсветки. При работе прибора светящиеся точки окружают область измерений (рис. 7).

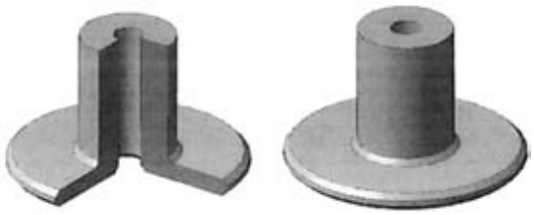


Рис. 6. Оправка для полировки оптоволокна

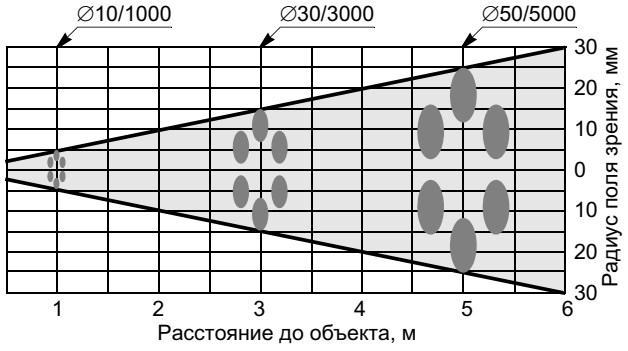
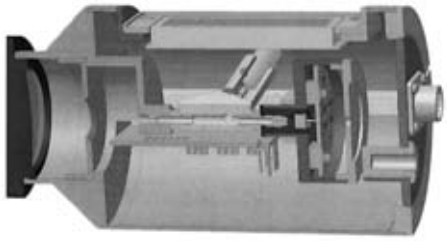


Рис. 7. Поле зрения пирометра ПД-9

а)



б)

Рис. 8. Пирометр ПД-9 (*а*) и его оптическая схема (*б*)

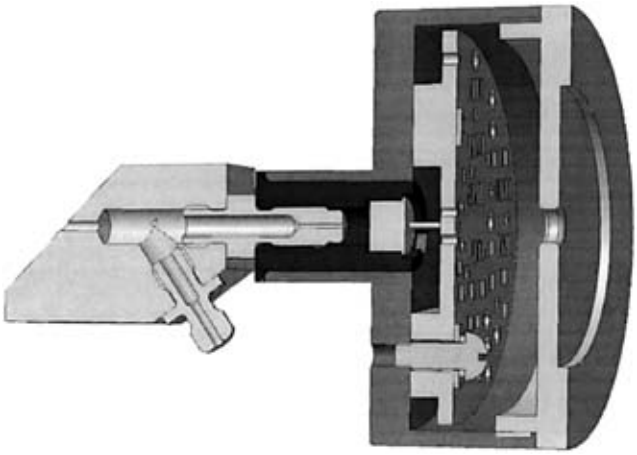


Рис. 9. Оптическая схема пирометра с зеркалом

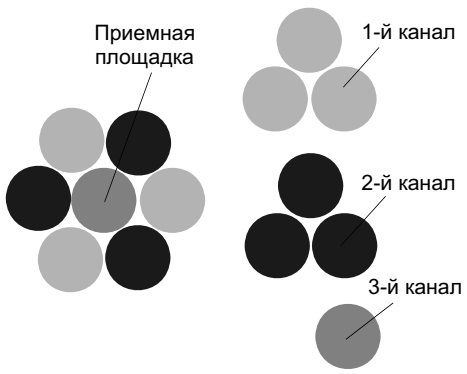


Рис. 10. Схема разделения каналов

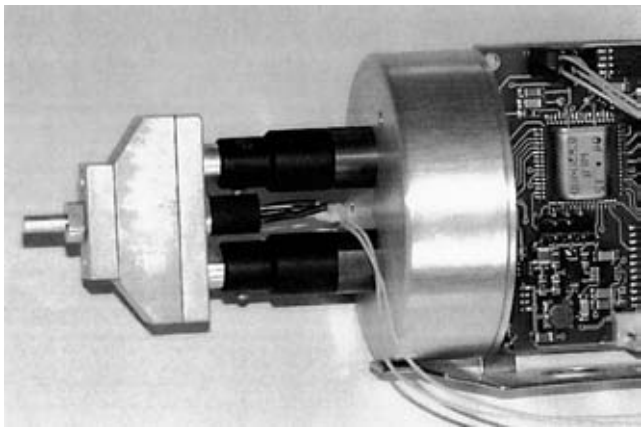


Рис. 11. Пирометр ПД-20

Введение оптоволокна в оптическую схему пирометра дает ряд положительных эффектов. Так как диаметр сердцевины мал, то показатель визирования получается не ниже 1:100—1:150. Переотражения и боковые засветки через волокно не проходят, так как попадают под большими углами. Пирометр ПД-9 приведен на рис. 8.

Добавив в конструкцию пирометра зеркало под углом 45°, можно получить достаточно интересную оптическую схему (рис. 9). Волокна подсветки заводятся в боковой штуцер и полируются вместе с зеркалом и сигнальным волокном. Наведение на объект можно осуществлять как по светящимся точкам, так и наблюдая его через окуляр визира.

Применение оптоволокна возможно при разделении измерительного канала на два в пирометре спектрального отношения ПД-20. В каждом канале устанавливается интерференционный фильтр, световой поток через который должен быть максимально параллельным (рис. 10). Центральное волокно используется для подсветки центра области измерения, два пучка по три волокна расходятся по каналам измерений.

Для подсветки центра области измерений устанавливается лазерный диод. Интерференционные фильтры и линзы термостатируются вместе с электроникой измерительной схемы (рис. 11).

В заключение отметим следующее: применение оптического волокна открывает новые возможности в разработке пирометрических средств измерений, улучшении параметров оптики, помехозащищенности и надежности, эргономичности и безопасности метрологических характеристик. Применение оптоволокна позволяет увеличить показатель визирования, расширить температурный диапазон эксплуатации, а также значительно снизить влияние электромагнитных полей на работоспособность прибора в пирометре ПД-7.

А. В. ДЖАГАНЯН, инж.
(НПФ "ПромПрибор", Москва),
В. Л. ЛЕПЕХА, инж.
(Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт")

Портативный вихретоковый дефектоскоп ВДЗ-71

Введение

Вихретоковый метод широко используется в практике неразрушающего контроля ответственных конструкций и деталей в различных отраслях. Если на начальном этапе этот метод широко применялся для выявления поверхностных дефектов, то в последние десятилетия он все чаще применяется для выявления и подповерхностных дефектов, в том числе дефектов усталостного и коррозионного происхождения.

Учитывая острую необходимость в современном вихретоковом дефектоскопе, который позволял бы осуществлять контроль качества изделий и обладал бы широким спектром возможностей при достаточной простоте в эксплуатации, специалистами фирмы "Промприбор" был разработан универсальный вихретоковый дефектоскоп ВДЗ-71 (рис. 1) [1].

Характеристики вихретокового дефектоскопа ВДЗ-71

Дефектоскоп предназначен для ручного контроля в целях выявления дефектов и оценки глубины выявленных дефектов с сохранением результатов контроля в памяти прибора для последующего анализа. ВДЗ-71 выявляет такие дефекты, как поверхностные трещины, подповерхностные трещины, изменение свойств материала, усталостные трещины, выбоины, дефекты коррозионного происхождения, дефекты, связанные с изменением толщины покрытия. При контроле нет необходимости в очистке контролируемой поверхности. Контроль может производиться с некоторым зазором между объектом контроля (ОК) и вихретоковым преобразователем (ВТП). Дружественный интерфейс дефектоскопа позволяет максимально просто и быстро произвести настройку прибора. ВДЗ-71 имеет один физический вихретоковый тракт, который обеспечивает работу в режиме одной или двух частот. Значение рабочих частот регулируются в пределах от 500 Гц до 6 МГц. Дефектоскоп позволяет подключать ВТП различных конфигураций: абсолютные и дифференциальные (как параметрические, так и трансформаторные), а также реализовывать мостовые схемы включения первичных преобразователей (рис. 2).

В комплект поставки прибора входит один преобразователь типа ПН-10 — ТД. По запросу заказчика могут быть также поставлены преобразователи, перечисленные в таблице. Эта особенность прибора существенно расширяет возможности контроля, увеличивает номенклатуру ОК, что позволяет решать следующие задачи:

- контроль отдельных отрезков несущих конструкций;
- контроль сварного шва с применением одноэлементных преобразователей;
- контроль балок, трубопроводов, труб различного диаметра, стержней, полосок, кабелей в оболочках;

Рис. 1. Ручной дефектоскоп ВДЗ-71

Рис. 2. ВТ-преобразователи к дефектоскопу

ВТП	Размер рабочей части, мм	Диапазон рабочих частот, кГц	Задачи, которые решаются с высокой эффективностью
ПН-10—ТД	9	40—120	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, коррозионных язв (питтинг) с зазором до 3 мм
МДФ 0701	7	1,0—20	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, коррозионных язв (питтинг) в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 3 мм в неферромагнитных материалах
МДФ 0901	9	0,4—15	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, коррозионных язв (питтинг) в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 5 мм в неферромагнитных материалах
МДФ 1201	12,5	0,1—200	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, коррозионных язв (питтинг) в разных материалах. Выявление дефектов на глубине до 8 мм в неферромагнитных материалах
МДФ 1502	15	1,0—500	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, коррозионных язв (питтинг) в разных материалах при автоматическом и ручном контроле с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов в неферромагнитных материалах через зазор или слой защитного покрытия толщиной до 10—12 мм
МДФ 3301	33	0,1—8	Выявление поверхностных и глубоко залегающих трещин, пор, коррозионных язв (питтинг) в разных материалах. Выявление грубых дефектов на глубине до 20 мм в неферромагнитных материалах
ПН-17×24 ТД2	17×24	80—120	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, коррозионных язв (питтинг) в разных материалах при автоматическом и ручном контроле
ПН-6×8-ТД-У-001	6×8	10—250	Выявление поверхностных дефектов типа трещин, пор в ферромагнитных материалах поперечного, продольного или локального направления
ПН-6-ТД-С-001	6	10—250	Выявление поверхностных дефектов типа трещин, пор в ферромагнитных материалах поперечного, продольного или локального направления. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности до 0,5 мм
ПН-12-ТД-С-001	12	10—250	Выявление поверхностных дефектов типа трещин, пор в ферромагнитных материалах поперечного, продольного или локального направления. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности до 3 мм

- контроль разнообразных металлических секций (из ферромагнитных и цветных материалов) с диэлектрической изоляцией или без нее, деталей машин, кузова, несущие конструкции, шестерни редукторов двигателей, шатуны, лонжероны, втулки приводов генераторов, стойки шасси, соединительные муфты, корпуса компрессоров, ходовые винты, разнообразные цилиндры, шестерни гидронасосов, упорные кольца, оси колес, пружины, винты, лопатки силовых турбин;
- контроль колесных пар и других деталей вагонных конструкций железнодорожного транспорта.

Вихретоковый метод не имеет альтернативы при решении многих авиационных задач. Метод особенно эффективен при обнаружении дефектов в многослойных авиационных конструкциях, под слоем герметика или краски, в отверстиях, в зоне заклепки, в том числе под ее головкой и пр.

Специфика объектов и методов контроля в данном случае стимулировала разработку специальных преобразователей. Необходимость получения хорошей чувствительности ВТП на низких рабочих частотах (контроль многослойных конструкций), высокой разрешающей способности (для выявления локальных дефектов типа пор и коротких трещин) привела к появлению комплекта новых мультидифференциальных ВТП типа Леотест МДФ для контроля на разных рабочих частотах [4—7].

Хорошее подавление первичного электромагнитного поля этими ВТП позволяет вести контроль с зазорами различной величины.

На лицевой панели дефектоскопа находится клавиатура для управления прибором. На дисплее воспроизводятся значения рабочих частот, частоты дискретизации, напряжения возбуждения, масштаба, фазы. Пролистывание изображений позволяет воспроизводить на экране дисплея до трех страниц. На каждой странице изображены одна зона отображения и две временные развертки. Каждая из зон отображает вихретоковый сигнал в двух вариантах:

— векторном, при котором в зоне отображается прямая линия (вектор), один ее конец — центр, второй указывает на текущее значение сигнала;

— комплексном, который позволяет выделять дефекты на фоне помех путем анализа формы годографа сигнала от дефекта.

Частота дискретизации регулируется оператором и может составлять до 3000 выборок в секунду.

Автоматическое измерение амплитуды и фазы сигнала позволяет оценить величину дефекта. Измеренные значения фазы или амплитуды напряжения необходимы для оценки величины дефекта в соответствии с выбранной калибровочной кривой,

которая обеспечивает сопоставление параметров амплитуды или фазы сигнала с параметрами дефекта в миллиметрах или в процентах от толщины стенки.

Необходимо отметить, что в ВДЗ-71 реализован достаточно мощный механизм автоматической сигнализации дефекта (АСД). Предусмотрено создание до четырех "рамок" (пороговых уровней) сигнализации для каждой зоны отображения. Эти рамки и сигнал в совокупности формируют событие (например, превышение сигналом порогового уровня). У оператора существует возможность настроить реакцию на событие:

- звуковой сигнал;
- подсветка светодиодов на панели прибора;
- сигнализация при помощи программных индикаторов;
- комбинация вышеперечисленных реакций.

При одновременной работе двух каналов для смешивания оператор может выбрать один из пяти алгоритмов: суммирование, вычитание, суммирование с инверсией по горизонтали, суммирование с инверсией по вертикали, произведение. Это позволяет избавиться от мешающего фактора, например влияния зазора, путем смешивания (вычитания) сигналов на разных частотах (каждая частота соответствует каналу).

ВДЗ-71 обладает способностью фильтрации сигнала в реальном времени. Существует пять видов фильтров: низкочастотный (ФНЧ), высокочастотный (ФВЧ), полосный, дифференциальный и усредняющий.

Оператор имеет возможность сохранять и загружать настройки дефектоскопа, что позволяет практически мгновенно адаптировать прибор под необходимую задачу.

Также существует возможность сохранять и загружать результаты контроля, что позволяет оператору одновременно решать несколько задач по дефектоскопии, сохраняя при этом целостность данных.

Дефектоскоп позволяет хранить на карте памяти типа CompactFlash объемом 128 Мб до двадцати настроек и результатов контроля, что существенно увеличивает производительность работы. Дефектоскоп оснащен USB портом для подключения к персональному компьютеру для передачи данных.

Данные контроля могут быть переданы на персональный компьютер для долговременного хранения, обработки, визуализации, создания баз данных по ОК, решения задач мониторинга их технического состояния. С помощью специально разработанного программного обеспечения (входит в комплект поставки) имеется возможность проведения анализа и создания документированных отчетов по результатам контроля.

Заключение

Портативный вихретоковый дефектоскоп ВДЗ-71 позволяет решать большой круг задач НК благодаря широкому диапазону рабочих частот. Реализована возможность представления сигналов в комплексной плоскости или представление компонент сигналов с временной разверткой. Дефектоскоп легко адаптируется к вихретоковым преобразователям различного типа.

Все разнообразие выполняемых функций и области применения обеспечиваются программно. Дефектоскоп ВДЗ-71 имеет достаточную чувствительность, что позволяет обнаруживать не только поверхностные трещины, но и подповерхностные дефекты, в том числе в многослойных конструкциях. Прибор обеспечивает сохранение результатов контроля, а также хранение настроек прибора.

Свойства дефектоскопа ВДЗ-71 позволяют рекомендовать его для решения таких актуальных задач НК, как:

- контроль сварных швов;
- контроль качества изделий проката — труб, стержней, проволоки, прутков и др.;
- контроль элементов энергетического оборудования, в том числе теплообменников с внутренними проходными преобразователями;
- контроль деталей транспортных средств в условиях их производства и эксплуатации;
- контроль резервуаров в химической, нефтегазовой и других отраслях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Луценко Г. Г., Гогуля В. Н., Рябец Т. А.* Совмещение возможностей стационарных систем контроля и мобильности ручного дефектоскопа — это реальность // В мире НК. 2004. № 4 (26). С. 32—34.
2. *Учанин В. Н., Дорофеев А. Л., Казаманов Ю. Г.* Выявление дефектов в неразъемных конструкциях // Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 1979. Вып. 6. С. 59—64.
3. *Учанин В. Н., Цирг В. Н.* Опыт применения низкочастотных вихретоковых дефектоскопов для выявления скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1989. № 4. С. 71—75.
4. *Учанин В. Н., Цирг В. Н.* Обнаружение скрытых коррозионных повреждений авиационных конструкций вихретоковым методом // Физ.-хим. механика материалов. 1990. № 4. С. 103—104.
5. *Uchanin V., Mook G., Stepinski T.* The investigation of deep penetrating high resolution EC probers for subsurface flaw detection and sizing. // European. Conf. for NDT.
6. *Uchanin V.* New type multidifferencial eddy current probes for surface and subsurface flaw detection // Zeszyty problemowe Badania neiniszczce (Warczawa). 2001. N 6. C. 201—294.
7. *Uchanin V.* The investigation of low frequency eddy current probes with super high penetration (THP04) // 16th WCNDT. Montreal, 2004.
8. *Возможность* повышения продуктивности вихретоковой дефектоскопии при применении мультидифференциальных преобразователей / В. Н. Учанин, А. В. Яшан, Р. Беккер, М. Диске // IV Нац. научно-техн. конф. и выставка “НКТД—2003”. Киев, 2003. С. 121—124.

"В мире неразрушающего контроля", 2006, № 4

Н. С. БОЛЬШАКОВ, инж.
ОАО "Новокузнецкий металлургический комбинат" (Новокузнецк)

Опыт использования компьютерной системы "Анализ кинематики и работоспособности" при автоматизированном проектировании и исследовании сложных механических систем

Современное эффективное проектирование сложных механических систем на основе плоских рычажных механизмов предусматривает многовариантность решения. Рациональный и оптимальный выбор осуществляется посредством кинематического анализа, особенно это актуально при проектировании исполнительных механизмов.

Компьютерная программа "Анализ кинематики и работоспособности" ("АКиР"), построенная на основе технологии Delphi, используется для проведения кинематического анализа и исследования траектории сложных механических систем, при этом можно осуществлять анализ сразу нескольких необходимых точек траектории. Ниже представлены возможности системы "АКиР" на примере исследования механизма строгального станка и КПМ переменной структуры механизма сдвоенного сталкивателя.

Рабочее окно программы представлено на рис. 1, в котором предусмотрены все необходимые для построения элементы: стойка, соединительное звено, шарнир, горизонтальный и вертикальные ползуны, стойка на звене, шарнир и ползун на звене.

Создание механизма интуитивно понятно и заключается в последовательном построении звеньев и кинематических пар, входящих в структуру механизма, однако необходимо учитывать, что система предназначена для анализа одноподвижных систем ($W = 1$) и использует только кинематические пары пятого класса ($В$ и $П$).

Рассмотрим построенные в программе "АКиР" механизмы. Механизм строгального станка (рис. 2) состоит из кривошипа *1*, которому задается движение, ползуна *2*, имеющего возможность поступательного движения по кулисе *3*, шатуна *4* и выходного звена — ползуна *5*. Подвижность данного механизма по формуле Чебышева равна 1:

$$W = 3n - 2p_5 = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 = 1,$$

где n — число звеньев; p_5 — число одноподвижных кинематических пар.

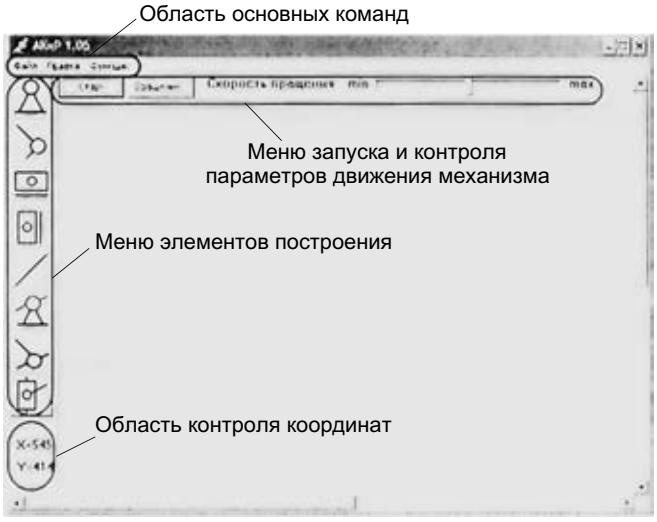


Рис. 1. Рабочее окно системы "АКиР"

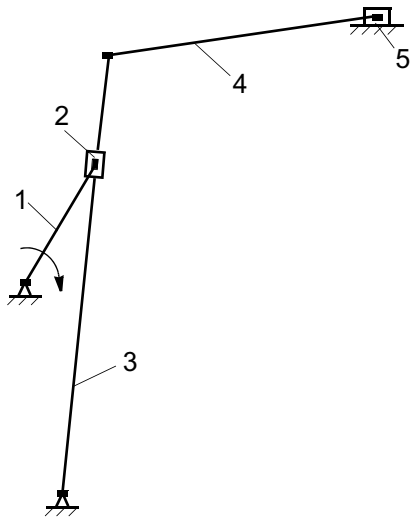


Рис. 2. Механизм строгального станка

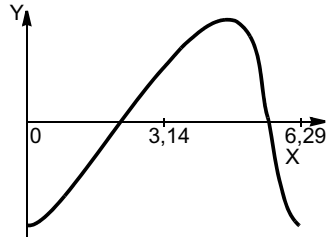


Рис. 3. График перемещения

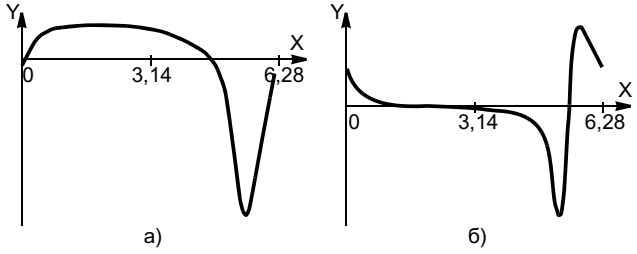


Рис. 4. Графики скорости (*а*) и ускорения (*б*)

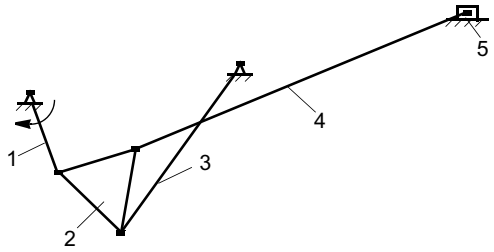


Рис. 5. КПМ переменной структуры

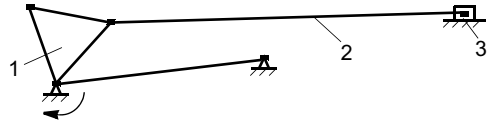


Рис. 6. Момент перехода механизма в КПМ

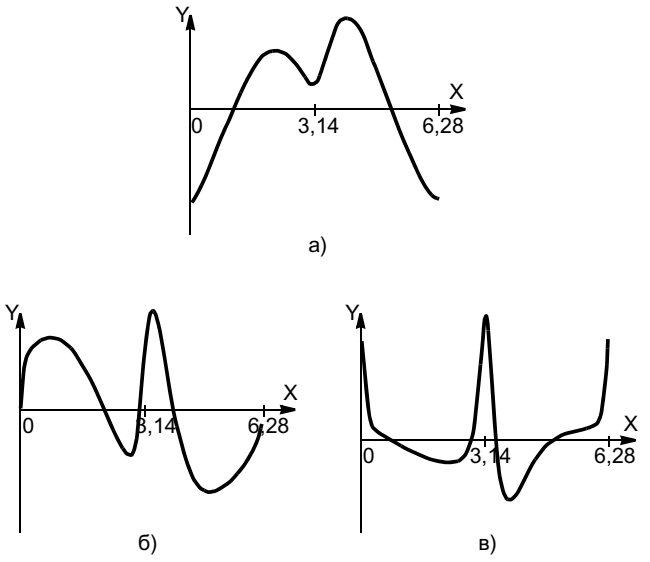


Рис. 7. Кинематические характеристики КПМ переменной структуры: *а—в* — графики перемещения, скорости и ускорения соответственно

Анализ кинематики заключается в построении графиков положений, скорости и ускорения. Помимо графиков приводится цифровая информация о текущем значении кинематических параметров для произвольного положения механизма. Для корректировки параметров в процессе исследования кинематики предусмотрена функция изменения длины и угловой скорости вращения ведущего звена (кривошипа). После построения графиков функция печати отправляет файл на установленный принтер. Переход в меню кинематического исследования осуществляется в падающем меню — Функции/Анализ точек. Диаграмма перемещения выходного ползуна *5* и общий вид меню анализа кинематики приведены на рис. 3. Функция положения позволяет отследить величину перемещения в любом произвольном положении механизма. Графики скорости и ускорения представлены на рис. 4.

Рассмотрим КПМ переменной структуры сдвоенного сталкивателя (рис. 5), который состоит из кривошипа *1*, трехпарного звена *2*, кулисы *3*, шатуна *4* и выходного звена — ползуна *5*, т. е. в механизме пять звеньев и семь пар пятого класса. Однако в процессе движения звеньев шарнир, соединяющий трехпарное звено и кулису, совпадает со стойкой, таким образом механизм становится обычным дезаксиальным кривошипно-ползунным (три звена и четыре одноподвижные кинематические пары) (рис. 6), ползуну сообщается повторное перемещение, что можно видеть на рис. 7.

Сообщение выходному звену — ползуну — обратного перемещения реализуется в машине двойного сталкивателя объекта, когда за первый максимум перемещения сталкивается один объект, а за второй максимум — второй, т. е. за один оборот кривошипа механизм реализует принцип двойного хода выходного звена.

Таким образом, полученные в компьютерной системе "Анализ кинематики и работоспособности" кинематические характеристики и траектории произвольных точек позволяют наиболее оптимально спроектировать принципиальную кинематическую схему плоских рычажных механизмов, сложных механических систем и механизмов переменной структуры.

З. М. ХАСАНОВ, канд. техн. наук,
О. З. ХАСАНОВ, студент
Уфимский государственный авиационный технический университет

Методика моделирования адаптивной системы управления автоматизированным электроприводом методом эквивалентных структурных преобразований

Введение

Несколько лет назад эффективность технологического оборудования, которым оснащались предприятия, оценивали по выпуску крупносерийной или массовой продукции. В настоящее время растущий спрос рынка на новую и разнообразную продукцию, характеризующуюся к тому же короткими сроками эксплуатации, можно удовлетворить, оснащая предприятия такими производственными системами, которые были бы в состоянии обеспечивать выпуск высококачественной продукции небольшими партиями при минимальных потерях и затратах. Увязать это требование экономии материальных и трудовых ресурсов с постоянным обновлением выпускаемой продукции как раз и позволяет автоматизированное производство.

На современных технологических станках дальнейшее повышение эффективности процессов обработки достигается как посредством автоматизации операций смены заготовок и магазина инструментов, так и с помощью встроенных систем автоматического управления точностью обработки, что позволяет вести непрерывную работу без участия оператора.

Одним из путей решения этой задачи является использование в автоматизированном электроприводе систем управления, содержащих математические модели объектов управления. Однако вследствие нестационарности электромагнитных процессов в электроприводе, отсутствия полной информации об объекте и других причин не всегда удается построить эффективную систему управления на базе неизменяемой математической модели.

В данной работе развивается подход к построению беспоисковых самонастраивающихся систем управления электроприводом и рассматривается математическая модель системы управления с так называемым сигнальным алгоритмом настройки, в котором эффект адаптации осуществляется введением на вход объекта управления или модели дополнительного сигнала [1].

Моделирование адаптивной системы управления электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения

Высокие требования, предъявляемые автоматизированным электроприводом к характеристикам систем управления, приводят во многих случаях к необходимости учета динамических параметров всей системы контрольно-измерительные устройства — система управления — электропривод. Системы автоматического управления электроприводами с микропроцессором или микроконтроллером в контуре регулирования в общем случае относятся к классу дискретных линейных систем. Структурная схема системы адаптивного управления электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения с эталонной моделью на внутреннем контуре и сигнальной настройкой на внешнем контуре приведена на рис. 1. Связь между непрерывным объектом и системой управления (СУ) осуществляется через АЦП и ЦАП.

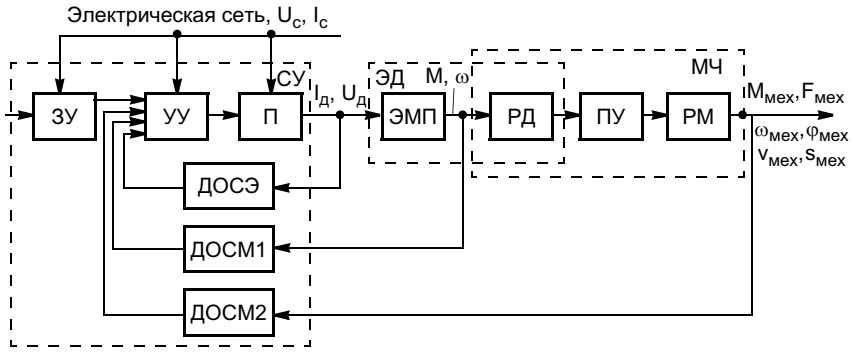


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения (*ЗУ* — задающее устройство, *УУ* — управляющее устройство, *П* — преобразователь, *РД* — ротор двигателя, *РМ* — рабочий механизм, *ПУ* — передаточное устройство, *ДОСЭ* — датчики обратной связи по электрическим параметрам, *ДОСМ1* — датчики обратной связи по механическим параметрам 1, *ДОСМ2* — датчики обратной связи по механическим параметрам 2, *ЭМП* — электромеханический преобразователь энергии, *ЭД* — электродвигательное устройство, *МЧ* — механическая часть электропривода)

Главным требованием к автоматизированным электроприводам является точность слежения за заданной траекторией, которая в современных приводах составляет единицы угловых минут. При этом превалирующим является требование по быстродействию, а требование по точности носит подчиненный характер. Привод должен при ограничениях на скорость обеспечивать заданное ка-

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 8

чество переходных процессов без статической ошибки при обработке углов порядка нескольких угловых минут при наличии момента нагрузки типа "сухое трение" и дополнительных моментов, зависящих от углового положения выходного вала. Построение электропривода с внешним цифровым контуром по принципу подчиненного регулирования тока и скорости уменьшает часть этих ошибок, связанных с алгоритмом управления, но и оставляет ошибки, обусловленные конструкцией электродвигателя.

Информация о моменте сопротивления вала электродвигателя μ_c необходима при расчете управляющих воздействий во всех режимах работы электропривода. Причем в режимах оптимального торможения или набора скорости для выбора соответствующей фазовой траектории требуется не только текущее значение момента, но и его аналитическое описание на данном участке движения:

$$\mu_c = A(\omega_в)^2 + B\omega_в\omega_р + C(\omega_р)^2, \qquad (1)$$

где $\omega_в$ — угловая скорость вала электродвигателя; $\omega_р$ — угловая скорость вала редуктора исполнительного механизма; A, B, C — коэффициенты, значения которых изменяются скачкообразно при изменении знака отношения $\omega_в/\omega_р$.

Если информация о скорости вала редуктора отсутствует, то момент может быть оценен в соответствии с выражением

$$\hat{\mu}_c = A(\omega_в)^2 + B\omega_в\hat{\omega}_р + C(\hat{\omega}_р)^2, \qquad (2)$$

где $\hat{\omega}_р$ — скорость вала редуктора, получаемая с помощью электронной схемы идентификации.

Рассматриваемый далее подход предусматривает использование зависимости

$$\mu_c = \mu_0 + \mu_1\omega_в|\omega_р|, \qquad (3)$$

достаточно точно определяющей функцию (1) при соответствующем выборе коэффициентов μ_0 и μ_1.

Аналогично выражению (2) момент сопротивления

$$\hat{\mu}_c = \hat{\mu}_0 + \hat{\mu}_1\omega_в|\omega_р|, \qquad (4)$$

где $\hat{\mu}_0$, $\hat{\mu}_1$ — соответствующие параметры выражения (4), вырабатываемые схемой контроля и идентификации углового положения вала электродвигателя.

Используем модель электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения, которая описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial I_я}{\partial\tau} = \dfrac{U_п - E(1 - R_я) - I_я R_я}{\theta R_я}; \\ \dfrac{\partial\omega_в}{\partial\tau} = \dfrac{R_я}{1 - R_я}(\mu - \mu_c); \\ \mu \equiv I_я,\ E \equiv \omega_в, \end{cases}$$

где $I_я$, $R_я$ — ток и сопротивление якорной цепи; $U_п$, E — соответственно напряжение питания и эдс электродвигателя; θ — электромагнитная постоянная времени; μ, μ_c — электромагнитный момент и момент статической нагрузки.

При построении алгоритма управления рассмотрим временной отрезок, на котором задана последовательность $\tau_0 < \tau_1 < ... < \tau_m < ... < \tau_n$, где $n \in N$ и последовательность значений идентифицируемой функции в узлах:

$$\omega_в(\tau_0) = \omega_в(0),\ \omega_в(\tau_1) = \omega_в(1);$$
$$\omega_в(\tau_1) = \omega_в(1),\ ...,\ \omega_в(\tau_{n-1}) = \omega_в(n-1);$$
$$\omega_в(\tau_n) = \omega_в(n).$$

Тогда для дискретного момента времени $\tau_n = \tau_0 + n\Delta\tau$, обозначив $k_я = R_я/(1 - R_я)$, запишем динамику изменения скорости $\omega_в$ в виде

$$\begin{cases} \omega_в(1) = \omega_в(0) + \Delta\tau k_я(\mu - \mu_c); \\ \omega_в(2) = \omega_в(1) + \Delta\tau k_я(\mu - \mu_c); \\ \vdots \\ \omega_в(n) = \omega_в(n-1) + \Delta\tau k_я(\mu - \mu_c). \end{cases} \qquad (5)$$

Введем

$$\begin{cases} \Delta\omega_в(1) = \omega_в(1) - \omega_в(0); \\ \Delta\omega_в(2) = \omega_в(2) - \omega_в(1); \\ \vdots \\ \Delta\omega_в(n) = \omega_в(n) - \omega_в(n-1) \end{cases}$$

и из уравнений (3) и (5) получим

$$\Delta\omega_в(m+1) = \Delta\omega_в(m) + \\ + \Delta\tau k_я[\Delta\mu(m) - \mu_1(m+1)\Delta\omega_в(m)|\Delta\omega_р(m)|], \qquad (6)$$

где $\Delta\mu(m+1) = \mu(m) - \mu(m-1)$ и $\Delta\omega_р(m+1) = \omega_р(m) - \omega_р(m-1)$.

Для оценивания неизвестного параметра μ_1 воспользуемся идентификатором, представленным адаптивным наблюдателем модели (6)

$$\Delta\hat{\omega}_в(m+1) = \Delta\hat{\omega}_в(m) + \Delta\tau k_я[\Delta\mu(m) - \\ - \hat{\mu}_1(m+1)\Delta\omega_в(m)\Delta\omega_р(m)] - k_0\xi(m+1), \qquad (7)$$

где $\Delta\hat{\omega}_в(m+1)$ — оценка переменной $\Delta\omega_в(m+1)$; $\xi(m+1) = \Delta\omega_в(m+1) - \Delta\hat{\omega}_в(m+1)$ — ошибка оценивания. Из уравнений (5) и (6) получим разностное уравнение ошибки

$$\xi(m+1) = (1 + k_0)\xi(m) - \Delta\tau k_я[\mu_1(m+1) - \\ - \hat{\mu}_1(m+1)]\Delta\omega_в(m)|\Delta\omega_р(m)|.$$

Параметр k_0 выбирается из условия устойчивости решения уравнения (7). Настройка параметра $\hat{\mu}_1(n-1)$ в контуре управления электродвигателем осуществляется изменением как скорости враще-

ния якоря, так и скорости торможения. Ведущими координатами для обоих случаев является дискретное время и координаты ошибки позиционирования. Для решения этой задачи предлагается следующий алгоритм:

$$\begin{cases} \hat{\mu}_1(m+1) = \hat{\mu}_1^{и}(m+1) - \hat{\mu}_1^{п}(m+1); \\ \hat{\mu}_1^{и}(m+1) = \hat{\mu}_1^{и}(m) - \dfrac{1}{\Delta\tau k_я} k_1 \operatorname{sign}\Delta\omega_в(m)|\Delta\omega_р(m)|\xi(m+1); \\ \hat{\mu}_1^{п}(m+1) = \hat{\mu}_1^{п}(m) - \dfrac{1}{\Delta\tau k_я} k_2 \operatorname{sign}\Delta\omega_в(m)|\Delta\omega_р(m)|\xi(m+1), \end{cases}$$

где $\hat{\mu}_1^{и}(m+1)$, $\hat{\mu}_1^{п}(m+1)$ — соответственно интегральные и пропорциональные составляющие алгоритма; k_1, k_2 — коэффициенты алгоритма адаптации, определяемые из условия $k_1/2 + k_2 > 0$.

Предложенный алгоритм обеспечивает асимптотическую устойчивость нулевого решения уравнения (7), т. е. $\xi(m+1) \to 0$. Следовательно, для любых $\Delta\omega_р$ и $\Delta\omega_в$ выполняется условие $\mu_1(m+1) - \hat{\mu}_1(m+1) \to 0$, которое определяет абсолютную точность оценки параметра $\mu_1(m+1)$.

Основная сложность реализации этого алгоритма заключается в необходимости использования в моменты перехода от времени τ_m к τ_{m+1} апостериорной ошибки $\xi(m+1)$, получение которой возможно лишь после очередного цикла настройки параметра $\hat{\mu}_1(m+1)$.

Эту сложность удается обойти путем использования априорной (измерительной) ошибки

$$\xi_1(m+1) = \Delta\omega_в(m+1) - \Delta\hat{\omega}_в(m+1).$$

Здесь $\Delta\omega_в(m+1)$ — априорная оценка $\Delta\omega_в(m+1)$, полученная до расчета $\hat{\mu}_1(m+2)$:

$$\Delta\hat{\omega}_в(m+1) = \Delta\hat{\omega}_в(m) +$$

$$+ \Delta\tau k_я[\Delta\mu(m) - \hat{\mu}_1^{и}(m+1)\Delta\omega_в(m)\Delta\omega_р(m)] - K\xi(m+1).$$

Связь ошибок $\xi_1(m+1)$ и $\xi(m+1)$ устанавливается выражением

$$\xi(m+1) = Q(m+1)\xi_1(m+1),$$

где $Q(m+1) = (1 + |\omega_в(m+1)\omega_р(m+1)k_1k_2)^{-1}$.

Однако скорость работы автоматизированного электропривода определяется не только быстродействием алгоритма управления, но и некомпенсированной постоянной времени $T_{нк}$, ограничивающей полосу пропускания широтно-импульсного преобразователя. Наименьшее значение $T_{нк}$ обусловлено только дискретностью этого преобразователя, поэтому известна функция

$$T_{нк(min)} = \frac{1}{2mf},$$

где m — пульсность силовой схемы; f — частота питающей сети. Для трехфазной мостовой схемы $T_{нк(min)} = 1{,}6$ мс.

СУ преобразователя характеризуется инерционными свойствами, поэтому для систем подчиненного регулирования принято считать $T_{нк} = 5$ мс. Это значение определяет быстродействие контура тока в преобразователе.

По условиям дополнительного нагрева и вибрации электродвигателя ограничим пульсации по контуру скорости и положения вала, которые вызывают дополнительную составляющую якорного тока. Допустимые пульсации тока определяются выражением

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{T_{нк}}{R_э\sqrt{1 + (2T_{нк}\omega_т)^6}} \leqslant (0{,}03 \div 0{,}10) I_{я(ном)},$$

где $R_э$ — эквивалентное сопротивление якорной цепи двигателя постоянного тока; $\omega_т$ — частота пульсации в цепи возбуждения якоря; $I_{я(ном)}$ — номинальный ток.

Результаты моделирования и экспериментальные исследования [2] показывают, что система управления электроприводом, содержащая датчик скорости и положения вала, позволяет обрабатывать без статической ошибки угловые перемещения исполнительного механизма электропривода от долей до нескольких угловых минут. При этом соответствующим выбором характеристики силового преобразователя электропривода может быть обеспечен необходимый скоростной диапазон вращения вала с учетом накладываемых ограничений, а параметрическая оптимизация этого электропривода обеспечивает минимальное энергопотребление и удовлетворяет требованиям по качеству переходных процессов.

Синтез адаптивной системы управления электроприводом методом эквивалентных структурных преобразований

Реализация алгоритмов управления на базе микропроцессорных средств управления предполагает, как правило, уже на стадии синтеза учет процессов дискретизации информационных данных и времени. Однако включение в контур управления микропроцессора еще не дает основания считать такую систему дискретной, на определенных этапах синтеза вполне допустим переход от дискретной по времени системы к ее непрерывной модели. Основным критерием обоснованности такого перехода является отношение частоты дискретизации $f_д$ к частоте пропускания системы $f_{пс}$ (или к наиболее высокочастотной составляющей спектра) $K = f_д/f_{пс}$. Если $2 < K < 5$, то дискретную по времени систему можно представить в виде непре-

рывной модели с дополнительным множителем $\exp(-T_0S/2)$, где S — переменная в преобразовании Лапласа. Причем для систем, у которых $K \geqslant 5$, влияние множителя $\exp(-T_0S/2)$ пренебрежимо мало [3]. Данный вывод следует из теоремы Котельникова—Шеннона, устанавливающей эквивалентность непрерывного и дискретного сигналов с точки зрения обработки и передачи информации.

Пусть компоненты векторов состояния $\vec{X}$, задающих воздействий $\vec{Y}$ и адаптивной настройки $\vec{J}$ регулируемых параметров электропривода наблюдаемы с периодом дискретизации $T_д$. Эти допущения будут сняты соответственно на этапах синтеза алгоритмов идентификации и при решении задачи формирования вектора задающих воздействий. Ограничения на компоненты вектора $\vec{X}$ могут быть сведены к ограничениям на модуль или скорость изменения вектора управления $\vec{U}$, а те, в свою очередь, к ограничениям на вектор задающих воздействий $\vec{Y}$. Темп изменения задающего воздействия в известных подсистемах управления электроприводами определяется блоками функционального и оперативного разгона-торможения интерполяторов.

На основе принятых допущений электропривод как динамическая система в низкочастотной области с достаточной точностью описывается линейным векторно-матричным дифференциальным уравнением в непрерывном времени

$$\begin{cases} \dfrac{d\vec{X}(t)}{dt} = A(X, S_1, J_1, t)\vec{X}(t) + B(X, S_1, J_1, t)\vec{U}(X, t) + \\ + C_1(X, S_1, J_1, t)\vec{S}_1(X, t) + D_1(X, S_1, J_1, t)\vec{J}_1(X, t); \\ \vec{Y}(X, t) = F(X, S_2, J_2, t)\vec{X}(Y, t) + \\ + C_2(X, S_2, J_2, t)\vec{S}_2(Y, t) + D_2(X, S_2, J_2, t)\vec{J}(Y, t); \\ \vec{Z}(X, Y, t) = H(X, Y, t)\vec{X}(Y, t); \\ X(0) = \text{const}; U(X, 0) = \text{const}; S_1(X, 0) = \text{const}; \\ J_1(X, 0) = \text{const}; Y(X, 0) = \text{const}; S_2(X, 0) = \text{const}; \\ J_2(X, 0) = \text{const}; Z(X, Y, 0) = \text{const}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\vec{X}(t)$ — n-мерный вектор состояния движения исполнительного механизма электропривода; $\vec{U}(X, t)$ — q-мерный вектор управления движением исполнительного механизма; $\vec{S}_1(X, t)$ — k_1-мерный вектор случайного процесса типа "белого шума", возмущающий состояние $\vec{X}(t)$; $\vec{S}_2(X, J, t)$ — k_2-мерный вектор случайного процесса типа "белого шума", возмущающий состояние вектора задающих воздействий $\vec{Y}(X, t)$; $\vec{J}_1(X, t)$ — m_1-мерный вектор адаптивной настройки регулируемых параметров X; $A(X, S_1, J_1, t)$ — $n \times n$-мерная матрица системы; $B(X, S_1, J_1, t)$ — $n \times q$-мерная матрица входа; $C_1(X, S_1, J_1, t)$, $D_1(X, S_1, J_1, t)$ — $k_1 \times k_1$ и $m_1 \times m_1$-мерные функциональные матрицы соответственно. Матрица $F(X, S_2, J_2, t)$ размером $p \times n$ ($p \leqslant n$) устанавливает связь между полным вектором состояния $\vec{X}(t)$ и p-мерным вектором измеряемой частью $\vec{Y}(X, t)$. $C_2(X, Z, J, t)$, $D_2(X, Z, J, t)$ — $k_2 \times k_2$ и $m_2 \times m_2$ -мерные функциональные матрицы соответственно; $\vec{Z}(X, Y, t)$ — n-мерный вектор выходных переменных, для управления движением которых и проектируется цифровой регулятор; $H(X, Y, t)$ — $n \times n$-мерная матрица выхода системы.

Пусть за критерий качества оптимальной работы адаптивной СУ электроприводом принимается значение интеграла от квадратичной формы

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} [Z_i^T(X_i, Y_i, t_i)R_{1(i)}(X_i, Y_i, t_i)Y_i(X_i, t_i) + \\ + U_i^T(X_i, t_i)R_{2(i)}(X_i, Y_i, t_i)U_i(X_i, t_i)]dt \to \min, \quad (9)$$

где $R_1(X_i, Y_i, t_i)$, $R_2(X_i, Y_i, t_i)$ — положительно определенные симметричные весовые матрицы, имеющие размерность $p \times p$ и $q \times q$ соответственно. Учет второго члена в критерии (9) позволяет при его минимизации иметь управляющие сигналы ограниченной амплитуды, что особенно важно при проектировании реальных подсистем управления электроприводами. Требуется определить для заданной последовательности времени ($t_0 < t_1 < t_2 < \ldots < t_{n-1} < t_n$, где $n \in N$) такое управление $\vec{U}_i(X_i, t_i)$, при котором перевод системы (8) из некоторого состояния $\vec{X}_{n-j}(t_{n-j})$ в состояние $\vec{X}_{n-j+1}(t_{n-j+1})$ обеспечит минимум квадратичному интегральному критерию качества (9).

Поставленная задача относится к классу вариационных и сводится к решению дифференциального уравнения Риккати

$$\frac{dP(X, Y, t)}{dt} = P^2(X, Y, t)B(X, S_1, J_1, t)R_2^{-1}(X, Y, t) \times \\ \times B^T(X, S_1, J_1, t) - H^T(X, Y, t)R_1(X, Y, t)H(X, Y, t) - \\ - A(X, S_1, J_1, t)P(X, Y, t) - A^T(X, S_1, J_1, t)P(X, Y, t). \quad (10)$$

Для заданного отрезка времени $t_i \ldots t_{i+1}$ граничное условие

$$P(X, Y, t_{i+1}) = 0.$$

Зная решение $P(X, Y, t)$, можно определить матрицу коэффициентов обратных связей $K(X, Y, t)$ размером $n \times q$ в соответствии с выражением

$$K(X, Y, t) = P(X, Y, t)B^T(X, S_1, J_1, t)R_2^{-1}(X, Y, t)$$

и сформировать оптимальное управление электроприводом в виде линейного закона

$$\vec{U}(X, t) = -K(X, Y, t)\vec{X}(t). \quad (11)$$

Характерным режимом работы реальных систем управления является не режим согласования переменных в нулевое состояние, а задание выходным переменным $\vec{Y}(X, t)$ предписанных значений с помощью вектора входных воздействий $\vec{U}(X, t)$. В этом случае выражение (11) дополняется слагаемым, обеспечивающим замкнутой системе требуемую настройку

$$U(X, t) = -K(X, Y, t)X(t) + W_{н}^{-1}(X, Y, t)U_{н}(X, t). \quad (12)$$

Здесь $W_{н}(X, Y, t)$ — функция замкнутой системы по управлению, равная $(I - A(X, S_1, J_1, t) + B(X, S_1, J_1, t)K(X, Y, t))^{-1}H(X, Y, t)B(X, S_1, J_1, t)$, где I — единичная матрица. Соответствующая уравнениям (8) и (12) структурная схема системы оптимального управления электроприводом приведена на рис. 2.

Кроме того, минимизация функционала (9) для системы уравнений (8) приводит к классической задаче о следящем регуляторе [4], и закон оптимального управления регулятором электропривода, полученный одним из методов динамической оптимизации, примет вид

$$U(X, t) = R_1^{-1}(X, Y, t)B(X, S_1, J_1, t) \times \\ \times [P(X, Y, t)X(t) - G(X, Y, t)], \quad (13)$$

где симметричная матрица $P(X, Y, t)$ — решение дифференциального уравнения Риккати (10).

Одним из методов решения уравнения (10) является метод диагонализации [5], алгоритмическая процедура которого заключается в следующем. Формируется матрица размером $2n \times 2n$:

$$M(t_i) = \begin{Vmatrix} A(t_i) & B(t_i)R_2^{-1}(t_i)B^T(t_i) \\ F^T(t_i)R_1(t_i)F(t_i) & A^T(t_i) \end{Vmatrix}.$$

Определяются n собственных векторов матрицы $M(t_i)$. Из полученных векторов образуется $2n \times n$-мерная матрица:

$$\begin{Vmatrix} M_{12}(t_i) \\ M_{22}(t_i) \end{Vmatrix} \quad (14)$$

где M_{12}, M_{22} — блоки матрицы размером $n \times n$ каждый.

Матрица (14) составляется на основе анализа собственных векторов матрицы $M(t_i)$. Все вещественные собственные вектора являются столбцами матрицы (14). Каждая комплексно-сопряженная пара формирует два столбца, один из которых является вещественной, а другой — мнимой его частями. Следовательно, решение уравнения Риккати

$$P(t_i) = \frac{M_{22}(t_i)}{M_{12}(t_i)}$$

с условием в конечной точке

$$P(t_к) = \frac{M_{22}(t_к)}{M_{12}(t_к)}. \quad (15)$$

Условие (15) для дифференциального уравнения Риккати (10) задано в конечной точке $t_к$, поэтому решают их в направлении от $t_к$ к t_0. Вектор состояния системы $\vec{X}(t_1)$, напротив, изменяется от t_0 к $t_к$, т. е. в прямом направлении времени. Кроме того, для определения закона оптимального управления электроприводом из соотношения (13) к моменту t_0 должны быть известны значения матриц $A(t_i)$, $B(t_i)$ и вектора возмущений $\vec{Y}(t_i)$ и адаптивной настройки $\vec{J}(t_i)$ на всем интервале t_0—$t_к$. Эта задача решается численным методом [6].

Задачу поиска эквивалентной структуры рассмотрим для системы меньшей размерности, например для системы второго порядка, так как экви-

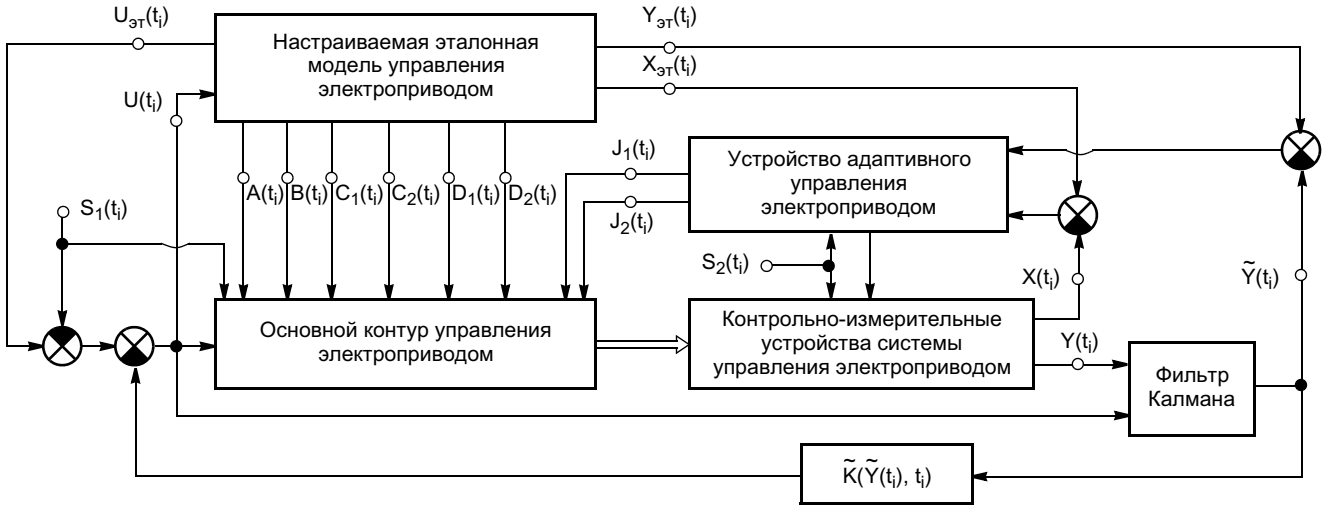


Рис. 2. Структурная схема системы оптимального управления электроприводом

валентная структура, удовлетворяющая условию экстремальности системы второго порядка, в качестве нижней границы минимального значения критерия будет удовлетворять и системам более высоких порядков.

Действительно, вектор $\vec{G}(X, Y, t)$ в уравнении (13) в соответствии с работой [7] можно вычислить из уравнений

$$\frac{dG(X, Y, t)}{dt} = P(X, Y, t)H(X, Y, t) -$$
$$- H^T(X, Y, t)R_1(X, Y, t)Y(X, t) - G(X, Y, t)[A(X, S_1, J_1, t) -$$
$$- P(X, Y, t)B(X, S_1, J_1, t)R_2^{-1}(X, Y, t)B^T(X, S_1, J_1, t)]$$

с конечным условием

$$G(X, Y, t_к) = H^T(X, Y, t_к)R(X, Y, t_к)Y(X, t_к).$$

Тогда задача построения СУ автоматизированным электроприводом заключается в нахождении функции управления

$$U(X, t) = f[Y(X, t)],$$

для которой критерий

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} [p_{1(i)} Y_i^2(X_i, t_i) + p_{2(i)} U_i^2(X_i, t_i)]dt_i \to \min \quad (16)$$

достигает минимума при удержании выходной переменной $Y(X, t)$ в нулевом заданном состоянии $Y_{эт(i)}(X_{эт(i)}, t_i)$. Положительно определенные коэффициенты $p_{1(i)}(X_i, Y_i, t_i)$ и $p_{2(i)}(X_i, Y_i, t_i)$ определяют вклад в критерий качества средних значений квадрата отклонения управляемой переменной от предписанного значения и квадрата управления, которое при этом затрачивается.

В соответствии с работой [8] для определения параметров адаптивной СУ электропривода в стационарных режимах из физических соображений верхний предел интегрирования критерия (16) заменим на бесконечность:

$$\int_{t_{i0}}^{\infty} [R_{1(i)} Y_i^2(X_i, t_i) + R_{2(i)} U_i^2(X_i, t_i)]dt_i \to \min. \quad (17)$$

Аналитическое решение задачи минимизации функционала (16) с бесконечным верхним пределом для автоматизированного электропривода с передаточной функцией звена второго порядка имеет вид

$$\begin{cases} \dfrac{dX_1(t)}{dt} = X_2(t); \\ \dfrac{dX_2(t)}{dt} = U(X, t); \\ X_1(t_0) = X_{10}; X_2(t_0) = X_{20}. \end{cases} \quad (18)$$

Следовательно, с учетом уравнения (18) выражение, описывающее закон управления автоматизированного электропривода, имеет вид

$$U(X, t) = G(X, Y, Z, t) - (X_1 + K_2 X_2). \quad (19)$$

При соответствующем выборе коэффициентов K_1 и K_2

$$\begin{cases} K_1 = \left(K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}\right)/2; \\ K_2 \geqslant 1 \end{cases}$$

искомая эквивалентная система может быть представлена апериодическим звеном первого порядка. Полученная эквивалентная система имеет минимальный порядок и удовлетворяет вектору прямых критериев качества, обеспечивая монотонность переходного процесса по выходной координате, высокое быстродействие, отсутствие перерегулирования.

Синтез и выбор параметров адаптивной СУ автоматизированного электропривода по стандартным показателям подчиненного регулирования представляют частную задачу оптимизации по квадратичным критериям вида (16). Если предположить эквивалентность системы подчиненного регулирования и системы, оптимальной по критерию (17), то структурный синтез оптимального регулятора можно проводить методом эквивалентных структурных преобразований линеаризованной системы подчиненного регулирования автоматизированного электропривода. Для этого необходимо структуру системы адаптивного управления электроприводом привести к виду, аналогичному структуре на рис. 3.

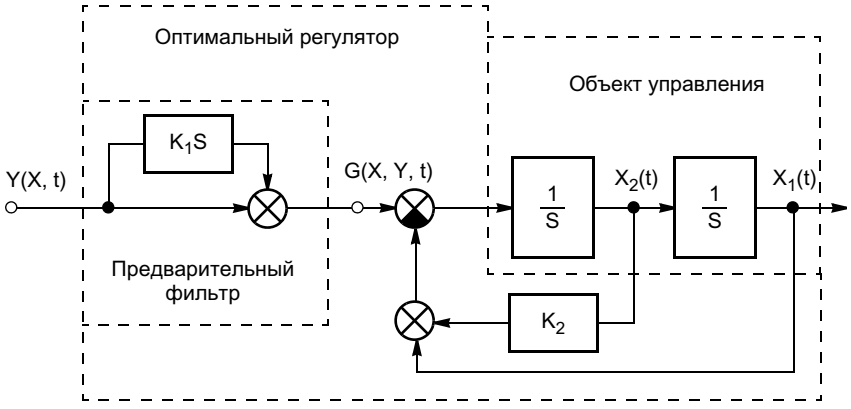


Рис. 3. Структурная схема электропривода постоянного тока с оптимальным регулятором

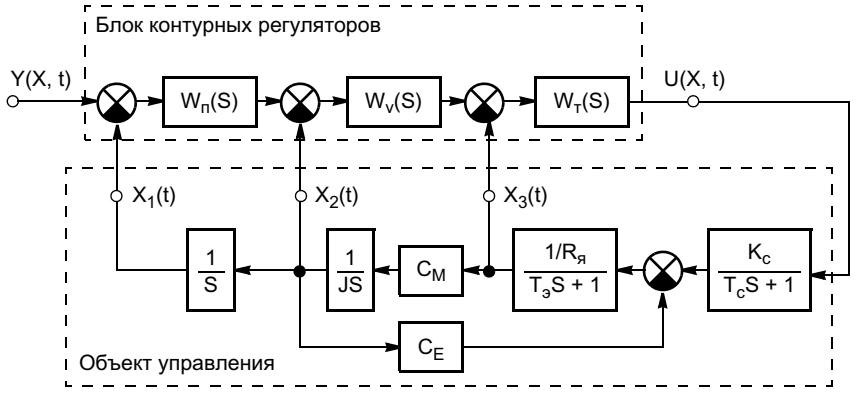


Рис. 4. Структурная схема адаптивной СУ электроприводом постоянного тока

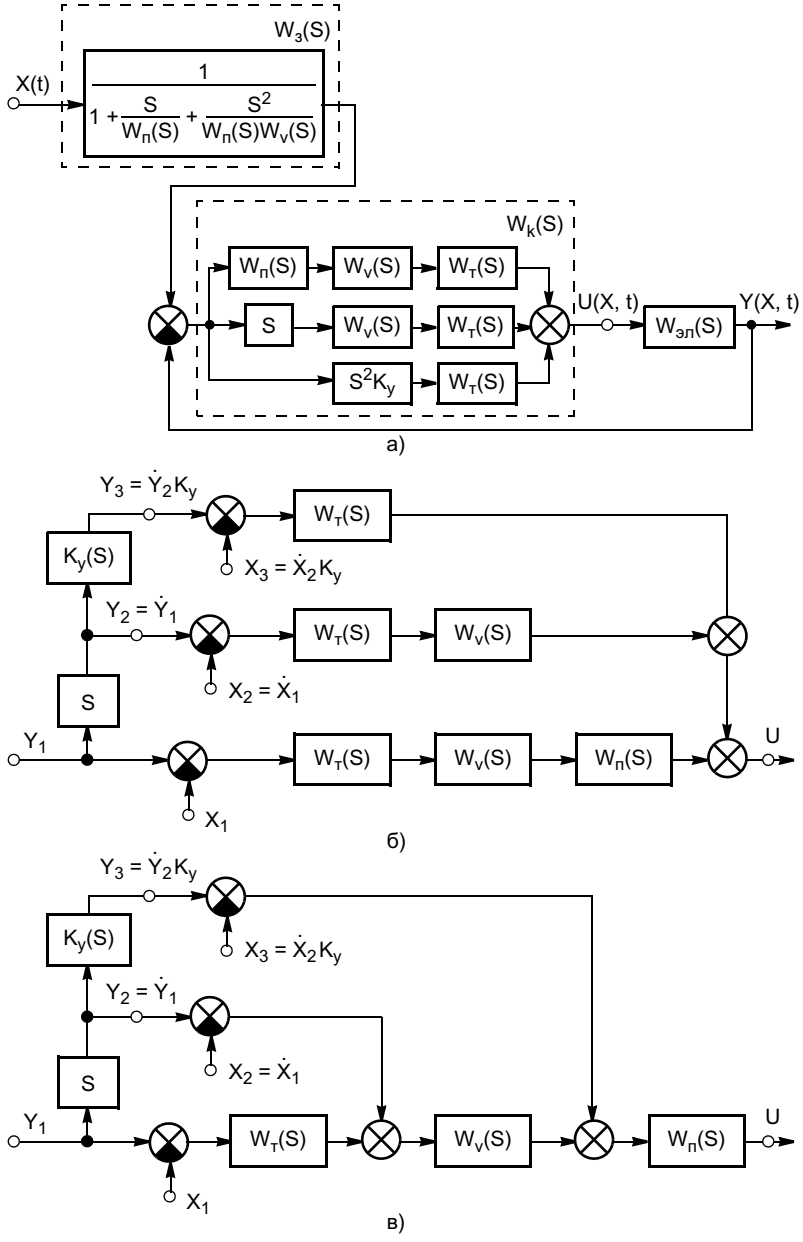


Рис. 5. К расчету параметров передаточных функций электропривода постоянного тока

Цель эквивалентных преобразований не ограничивается поиском структуры и оптимизации параметров адаптивного регулятора автоматизированного электропривода. Не меньший интерес представляет сопоставление динамических характеристик регулятора, синтезированных на основе минимизации критерия (17), и регулятора с подчиненным автоматизированным управлением. Критерий (17) не учитывает дифференцирующих свойств интерполятора адаптивного регулятора и поэтому отличается от исходного критерия (9), (16) для основного контура СУ. Тем не менее, все критерии минимизируют контурную ошибку и в этом отношении эквивалентны. Эти вопросы также необходимо учесть в процессе структурного синтеза.

Структурная схема адаптивной СУ линеаризованным электроприводом приведена на рис. 4. В структурной схеме момент вязкого трения ротора двигателя отнесен к составляющей момента нагрузки. Здесь, если вектор возмущающих воздействий $\vec{Y}(X, t) = 0$, то сигнал тока якорной цепи электропривода пропорционален ускорению с коэффициентом пропорциональности $K_y = J_\Sigma/C_м$.

Из исходной структурной схемы рис. 4 переводом точек съема сигналов X_2, X_3 к выходу объекта управления и переносом элементов сравнений контурных регуляторов $W_п(S)$, $W_v(S)$, $W_т(S)$ вправо за регулятор тока $W_т(S)$ получим эквивалентное структурное преобразование в системе подчиненного регулирования линеаризованным электроприводом, представленное на рис. 5, *а*.

В результате проведенного преобразования блок регуляторов подчиненных контуров распался на контурный регулятор $W_к(S)$ и регулятор вне контура обратной связи $W_з(S)$. Дифференцирующие звенья блока $W_к(S)$ вынесем влево за элемент сравнения, восстановив обратные связи по переменным X_2, X_3 (рис. 5, *б*). Далее простым преобра-

зованием приведем пирамидальную структуру рис. 6 к виду, представленному на рис. 5, *в*.

Характеристический полином адаптивного регулятора электропривода

$$X_{оу} = S(\alpha_3 S^3 + \alpha_2 S^2 + \alpha_1 S + \alpha_0),$$

где $\alpha_3 = \frac{T_с T_э J_\Sigma R_я}{C_м C_е}$; $\alpha_2 = \frac{(T_с + T_э) J_\Sigma R_я}{C_м C_е}$; $\alpha_3 = \frac{T_с T_э J_\Sigma R_я}{C_м C_е}$; $\alpha_0 = 1$; $T_с$ — постоянная времени силового преобразователя электропривода; $T_э$ — электромагнитная постоянная времени электропривода; J_Σ — приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции; $R_я$ — активное сопротивление якорной цепи; $C_м$, $C_е$ — конструктивные постоянные, характеризующие соответственно связь между током и моментом электродвигателя, между скоростью и эдс двигателя электропривода.

Если задающее воздействие (см. рис. 5, *в*) поступает непосредственно на вход одноконтурной системы управления регулятором линеаризованного электропривода, то для перехода к заданной выше эквивалентной системе достаточно выбрать следующие передаточные функции блоков:

$$W_т(S) = \tau_т S + 1;\ W_v(S) = K_с;\ W_п(S) = K_п. \qquad (20)$$

В этом случае уравнения параметрической настройки имеют вид

$$\begin{cases} t_т J_\Sigma C_м = \alpha_3; \\ J_\Sigma C_м + K_с \tau_т = \alpha_2; \\ K_с + K_п K_с \tau_т = \alpha_1; \\ K_п K_с = 1. \end{cases} \qquad (21)$$

При выполнении условий уравнения (21) передаточная функция адаптивного регулятора описывается передаточной функцией апериодического звена первого порядка, имеющей постоянное время $T_З = 1/K_с$.

Адаптивная система управления электроприводом, приведенная на рис. 3, разработана для случая с экспоненциальным задающим воздействием. Поэтому при анализе данной СУ на типовое ступенчатое воздействие на входе предварительного фильтра необходимо включить апериодическое звено первого порядка. Тогда в адаптивном регуляторе электропривода блок с передаточной функцией $W_к(S)$ обеспечивает глобальный минимум квадрата ошибки по положению, а блок с передаточной функцией $W_з(S)$ определяет темп изменения задающего воздействия, связан в критерии (17) с ограничением на управление $U(X, t)$.

Вышеприведенный несложный анализ доказывает структурную эквивалентность построения рассматриваемых регуляторов. Структурная эквивалентность предполагает одинаковые потенциальные возможности динамических характеристик регуляторов. Однако данное утверждение справедливо только для автономных регуляторов электроприводов со случайным входным воздействием. Параметрическая настройка задатчика интенсивности адаптивной СУ и основного контура могут осуществляться независимо. Например, функции задатчика интенсивности регулятора могут быть переданы блокам разгона-торможения интерполяторов СУ. В системе подчиненного регулирования разделение функций блоков $W_к(S)$, $W_з(S)$ невозможно. Кроме того, выбор передаточных функций контуров скорости $W_v(S)$ и положения $W_п(S)$ однозначно определяют структуру задатчика интенсивности, что не исключает противоречия между быстродействием и качеством переходного процесса.

Критерий качества (9), учитывающий дифференцирующие свойства интерполятора СУ, исключает в следящем электроприводе обратную связь по положению. Естественно, это не должно влиять на точность воспроизведения заданного контура. Перечисленным условиям удовлетворяет следующий выбор передаточных функций блоков:

$$W_п(S) = 0;\ W_с(S) = K_{р1};\ W_т(S) = K_{р2} S + K_{р3} + \frac{K_{р4}}{S}. \qquad (22)$$

Уравнения параметрической настройки для этого случая:

$$\begin{cases} K_у K_{р2} = \alpha_3; \\ K_у K_{р2} + K_{р1} K_{р2} = \alpha_2; \\ K_{р1} K_{р3} + K_у K_{р4} = \alpha_1; \\ K_{р1} K_{р4} = \alpha_0. \end{cases} \qquad (23)$$

Вынесем из регулятора на его вход один дифференциатор, роль которого выполняет интерполятор СУ, и с учетом соотношений (22) получим структуру оптимального регулятора (рис. 6) для критерия (9).

Из эквивалентности структур регуляторов на рис. 5, *в* и 6 еще не следует эквивалентность критериев (9), (17) в методическом отношении, т. е. формальное применение классических методов оптимизации систем по указанным критериям приводит к различным решениям. Результаты решения задачи оптимизации параметров регулятора по интегральным критериям качества управления в большой степени зависят от совокупности принятых ограничений, которые не всегда формализуемы. Наиболее трудно формализуемы структурные огра-

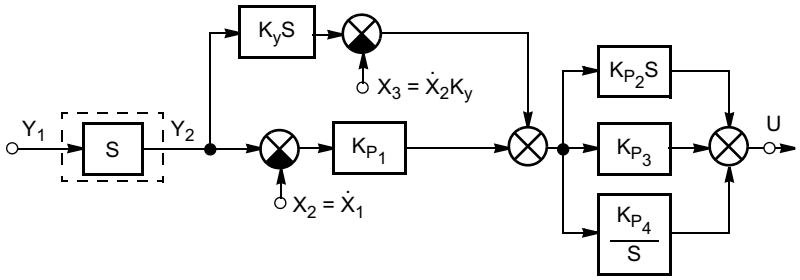


Рис. 6. Структурная схема оптимального управления электроприводом

ничения, например, связанные с несовпадением физической размерности задания (скорость) и выходной координаты (положения) исполнительного механизма. Другое не формализуемое структурное ограничение — неполная наблюдаемость параметров вектора, описывающего движение исполнительного механизма электропривода. Требование полной наблюдаемости является необходимым условием оптимизации квадратичных критериев качества и со скалярными подынтегральными функциями. Это следует из симметричности матрицы $P(X, Y, t)$ в уравнении (10). Как было показано выше, отсутствие информации о третьей производной от выходной координаты электропривода приводит всего к одной операции дифференцирования в контуре обратной связи. При низком уровне шумов однократное дифференцирование вполне приемлемо.

В области средних частот $2 < f_0/f_{пр} < 5$ необходимо учитывать влияние чистого запаздывания, вносимого в систему дискретными элементами СУ. Обычно влияние чистого запаздывания на этапе синтеза учитывают одним из двух методов. Параметрический метод основан на определении граничных значений контурных коэффициентов или полосы пропускания частот, гарантирующих устойчивую работу системы. Структурный метод предполагает введение в систему специализированных корректоров (предикаторов), снижающих отрицательное влияние запаздывания, и в микропроцессорном варианте управления более предпочтителен.

Структурная схема регулятора оптимального управления электроприводом с предикатором и дополнительной связью по задающему воздействию приведена на рис. 7.

Передаточная функция предикатора для разомкнутой системы с запаздыванием $W_р(S) = \tau(S) + W_{эп}(S)$ имеет вид

$$W_{пр}(S) = \frac{1}{(1 + W_{эп}(S) - \tau(S)W_{эп}(S))}, \qquad (24)$$

где $W_{эп}(S)$ — передаточная функция разомкнутой системы без учета запаздывания; $\tau(S)$ — звено чистого запаздывания.

Тогда передаточная функция замкнутой системы с предикатором

$$W_з(S) = \frac{W_{эп}(S)\tau(S)}{W_{эп}(S) + 1}$$

поясняет его корректирующие свойства. Из выражения (24) следует, что предикатор имеет простую структуру, если минимален порядок разомкнутой системы и запаздывание в системе можно представить отдельным звеном. В рассматриваемом случае $W_{эп}(S)$ — это передаточная функция объекта управления, скорректированного контурным регулятором, $W_{эп}(S) = K_с/S$, и первое условие выполняется.

Для обеспечения второго условия необходимо, чтобы величина запаздывания была одинаковой по всем путям, проходящим через предикатор от вхо-

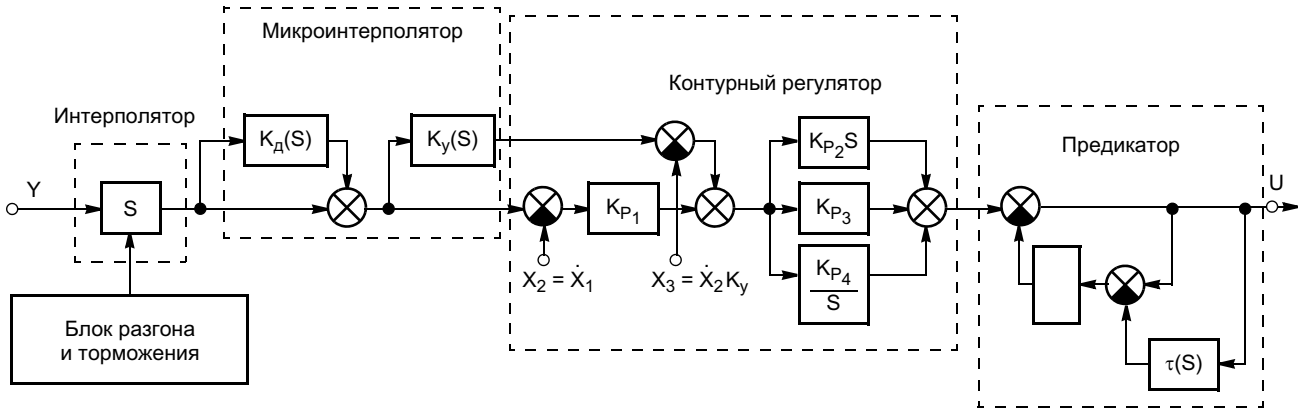


Рис. 7. Структурная схема СУ электроприводом с предикатором и дополнительной связью по задающему воздействию

да СУ к ее выходу. Указанное требование может не выполняться для пути, проходящего через элемент сравнения компонентов вектора состояния объекта и вектора задающих воздействий.

При гармоническом задающем воздействии и некоторых ограничениях к коэффициенту $K_с$ предпочтителен переход к комбинированному управлению по заданию. Передаточная функция разомкнутой скорректированной системы определяется по формуле $W_{эп}(S) = K_с/S$, тогда передаточная функция цепи с дополнительной связью по задающему воздействию определяется в соответствии с уравнениями

$$W_{зв}(S) = K_д S,\ K_д = 1/K_с.$$

На этапе параметрического синтеза определяют значения параметров объекта, после чего из решения нелинейной системы (23) находят коэффициенты регулятора. Нелинейная система (23) методом подстановки сводится к линейному алгебраическому уравнению 3-й степени и, если полином объекта $X_{0у}(S)$ имеет только вещественные корни, легко разрешима. Последнее условие при определенном сочетании параметров объекта $J_\Sigma < 4T_э$ может не выполняться. В таком случае характеристический полином $X_{0у}(S)$ необходимо представить в виде

$$X_{0у}(S) = D(S)L(S),$$

где $D(S)$ — полином, содержащий только вещественные корни; $L(S)$ — полином с комплексными корнями, а систему (23) необходимо разбить на две независимые подсистемы. Применительно к объекту управления на рис. 4 имеем

$$D(S) = (d_1 s + d_0),\ d_0 = 1;$$

$$L(S) = (l_2 s^2 + l_1 s + l_0),$$

соответственно, модифицированные уравнения параметрической настройки

$$K_{р2} = l_2;\ K_{р3} = l_1;\ K_{р4} = l_0;\ K_у/K_{р1} = d_1. \qquad (25)$$

Теперь коэффициенты регулятора на рис. 7 связаны с параметрами автоматизированного электропривода линейными зависимостями (25), существенно упрощающими процедуру настройки.

ВЫВОДЫ

1. Полученные с помощью моделирования данные позволили определить предел статической ошибки позиционирования исполнительного механизма электропривода, составляющий от долей до нескольких угловых минут. При этом соответствующим выбором характеристики силового преобразователя электропривода может быть обеспечен необходимый скоростной диапазон вращения вала с учетом накладываемых ограничений.

2. Разработанная расчетная методика позволяет перейти к решению задач оптимального управления автоматизированным электроприводом в условиях полностью измеряемого вектора состояния объекта управления по принципу эталонной модели, начальные условия для которой вычисляют исходя из заданных краевых условий. Преимуществом методики является не только простота заложенных в расчет принципов и хорошее совпадение с экспериментальными данными, но и возможность расчета адаптивных систем управления автоматизированного электропривода на базе многопроцессорной техники с сигнальными алгоритмами настройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г.* Управление электроприводами. Л.: Энергоатомиздат, 1982. 391 с.
2. *Хасанов З. М., Хасанов О. З.* Об эффективности использования функций связи между контрольно-управляющими устройствами в системах адаптивного управления электроприводами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 32—39.
3. *Основы* проектирования следящих систем / Под ред. Н. А. Лакоты. М.: Машиностроение, 1978. 391 с.
4. *Синх М., Титли А.* Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение, 1986. 475 с.
5. *Коу Б.* Теория и проектирование цифровых систем: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.
6. *Башарин А. В., Постников Ю. В.* Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 512 с.
7. *Программное* управление станками / В. Л. Сасонкин, О. П. Михайлов, Ю. А. Павлов и др. М.: Машиностроение, 1981. 398 с.
8. *Колесников А. А.* Последовательная оптимизация нелинейных агрегированных систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 160 с.

В. П. КАРГАПОЛЬЦЕВ, инж.
(ОКБ "Гидродинамика", г. Киров),
И. Я. СИМАХИН, инж.
(Предприятие "Энергис", г. Киров)

Энергосбережение с применением защитного мониторинга электродвигателей

Государственная политика в области энергосбережения предопределяет, в частности, нормирование и снижение потерь электрической энергии в электрических сетях. В настоящее время конечный потребитель энергии нуждается не только в энергосбережении на подающих сетях, но и в повышении эффективности использования всего имеющегося электрооборудования. До 70 % электрической энергии в России расходует промышленность, а в промышленном секторе самым внушительным является парк асинхронного электропривода.

Современные стандарты большинства стран мира, в том числе и России, предъявляют все более высокие требования к повышению безопасности работы персонала и росту экономической эффективности во всех отраслях промышленности. Эти факторы определяют потребность в анализе работы и эффективной защите оборудования и механизмов, приводимых в действие асинхронными электродвигателями. Пренебрежение указанными требованиями приводит к непредвиденному и значительному ущербу от снижения срока службы оборудования, повышению вероятности травмирования персонала. Одним из элементов такого анализа является работа по выявлению причин перерасхода электроэнергии на базе монитора тока двигателя МТД-RS (рис. 1), проведение которой позволит потребителям получать обьективные данные об энергоиспользовании, энергоснабжающей организации (гарантирующему поставщику) и потребителям решать возникающие спорные вопросы.

К основным причинам перерасхода электроэнергии относят:

— нарушение технологического режима работы оборудования, под которым понимается отклонение наиболее значимых технологических параметров от их оптимальных значений. Диапазон оптимальных значений может быть определен на основе технологических регламентов работы оборудования;

— неплановые простои оборудования (их увеличение). Данные о количестве и причинах неплановых простоев предоставляются производственно-техническим (ПТО) отделом предприятия;

— изменение качества поставляемого сырья. Расход электроэнергии может быть определен по статистическим данным при работе оборудования на сырье разного качества;

— перебои в снабжении электроэнергией: условно-плановые и неплановые.

В случае условно-плановых отключений гарантирующий поставщик электроэнергии не несет ответственности за дополнительные расходы электроэнергии, связанные с вновь включаемым в работу оборудованием.

Неплановые отключения электроэнергии вызывают нарушение технологического регламента производства, дополнительные расходы энергии на разогрев оборудования, дополнительные затраты, связанные с возможной потерей части обрабатываемого сырья и т. д., поэтому все перерасходы электроэнергии, возникающие по

Рис. 1. Монитор тока двигателя МТД-RS

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 8

этой причине, компенсируются за счет средств, перечисленных предприятию поставщиками электроэнергии как плата за экономический ущерб.

Предлагается создать на предприятии банк данных по возможным группам причин перерасхода электроэнергии с разбивкой на отдельные составляющие, характерные для данного предприятия. Так как расчет перерасхода электроэнергии зачастую затруднен, то для этих целей необходимо использовать систему мониторинга и программные средства по составлению энергетических балансов оборудования, предприятия, организации. Анализ причин перерасхода электроэнергии поможет найти слабые с точки зрения экономического расходования энергоресурсов места и разработать мероприятия по экономии топливно-энергетических ресурсов.

На Кировском предприятии "Энергис" разработано новое функциональное решение — монитор тока с приемопередачей данных (МТД-RS). Появилась дополнительная возможность контролировать работоспособность и экономичность электрооборудования с помощью временных графиков тока, напряжения, полной потребленной мощности. Так, на рис. 2 приведены контролируемые монитором параметры энергии, на рис. 3 — временные параметры.

Монитор тока двигателя с функцией обмена данными и управлением по интерфейсу RS-485 (МТД-RS) в комплекте с первичными преобразователями — датчиками тока предназначен для измерения тока, напряжения сети и защитного отключения нагрузки в сетях переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В и номинальными токами нагрузки от 1 до 250 А. Для местного визуального контроля применен двухстрочный 16-миллиметровый ЖКИ-индикатор с постоянной подсветкой. Прибор МТД-RS может

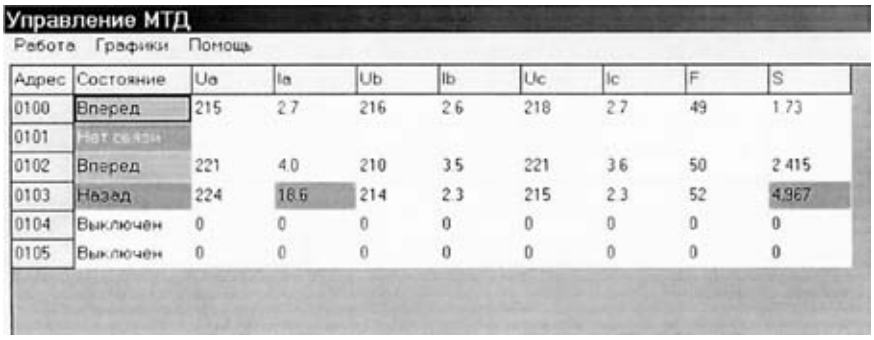


Рис. 2. Основное окно программы

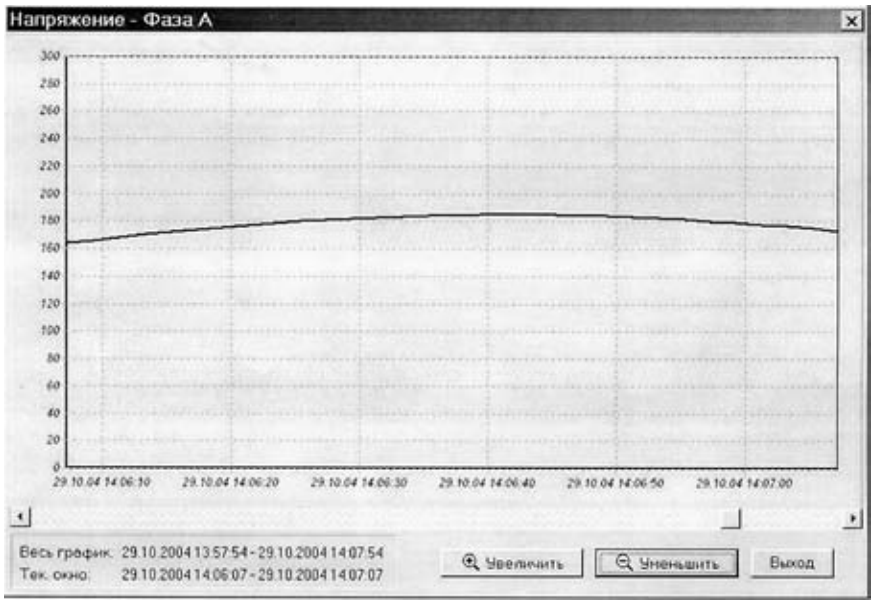


Рис. 3. Временной график контроля напряжения

быть использован в системах контроля, управления и защиты при выполнении технологических процессов в разных отраслях промышленности, сельского хозяйства и жилищно-коммунальной сферы.

Выполняемые функции:

— активация функций и изменение заводских уставок потребителем;

— защитное отключение электроустановок в системах переменного тока;

— контроль и индикация тока, напряжения, мощности и частоты каждой фазы;

— передача информации через последовательный стык RS-485 на ЭВМ верхнего уровня по специальному протоколу, обеспечивающему защиту информации от искажения и потерь;

— дистанционная установка настроек самого прибора и настроек допустимых пределов тока нагрузки, напряжения, частоты питающей сети, времени длительной перегрузки, времени срабатывания защиты, времени срабатывания защиты обрыва фазы, защитного времени переключения реверса питающих фаз.

Таким образом, наличие специализированной системы мониторинга энергии позволит выявить причины и величину перерасхода энергии, определить возможность пути повышения эффективности использования энергоресурсов предприятия.

Системы промышленной автоматизации и их интеграция. **Средства информационной поддержки жизненного цикла продукции. Безопасность информации.** Основные положения и общие требования (ГОСТ Р 52611—2006)

Стандарт разработан ОАО "Финансовая лизинговая компания" совместно с ЗАО "РНТ" при участии Федерального государственного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования "Государственный центр профессиональной переподготовки и повышения квалификации кадров в области CALS-технологий" и Ассоциации ЕВРААС. Внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 459 "Информационная поддержка жизненного цикла изделий". Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 декабря 2006 г. № 304-ст. Введен впервые. Дата введения 2007-07-01.

1. Область применения

Настоящий стандарт устанавливает основные положения при задании требований и общие требования по безопасности информации к средствам информационной поддержки жизненного цикла продукции и предназначен для использования заказчиками, разработчиками, владельцами и пользователями средств информационной поддержки жизненного цикла продукции.

2. Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

— ГОСТ Р 1.0—2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения";

— ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2—2002 "Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2. Функциональные требования безопасности";

— ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3—2002 "Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3. Требования доверия к безопасности".

Примечание. При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов по указателю "Национальные стандарты", составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3. Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями.

3.1. **Продукция:** результат деятельности, представленный в материально-вещественной форме и предназначенный для дальнейшего использования в хозяйственных и иных целях.

3.2. **Средства информационной поддержки жизненного цикла продукции (СИПЖЦП):** аппаратные, программно-аппаратные, программные средства, реализующие процессы сбора, обработки, накопления, хранения и поиска информации в интегрированной информационной среде.

3.3. **Информационная поддержка жизненного цикла продукции:** концепция и идеология информационной поддержки жизненного цикла продукции на всех его стадиях, основанные на использовании единого информационного пространства (интегрированной информационной среды), обеспечивающие единообразные способы информационного взаимодействия всех участников этого цикла: заказчиков продукции (включая государственные учреждения и ведомства), поставщиков (производителей) продукции, эксплуатационного и обслуживающего персонала, реализованные посредством нормативных документов (НД), регламентирующих правила указанного взаимодействия преимущественно посредством электронного обмена данными.

3.4. **Интегрированная информационная среда (ИИС):** совокупность распределенных баз данных, содержащих сведения о продукции, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающая корректность, актуальность, сохранность и доступность данных субъектов производственно-хозяйственной деятельности, участвующих в осуществлении жизненного цикла продукции. Все данные в ИИС хранятся в виде информационных объектов.

3.5. **Жизненный цикл продукции (ЖЦП):** совокупность взаимосвязанных процессов (этапов) создания и последовательного изменения состояния продукции, обеспечивающей потребности заказчика.

3.6. **Участник обеспечения жизненного цикла продукции:** юридическое или физическое лицо, выполняющее (реализующее) один или несколько этапов жизненного цикла продукции и выступающее в роли заказчика либо исполнителя одного или нескольких этапов жизненного цикла продукции.

3.7. **Обладатель информации:** лицо, самостоятельно создавшее информацию либо получившее на основании закона или договора право разрешать или ограничивать доступ к информации, определяемой по каким-либо признакам.

3.8. **Конфиденциальность информации:** обязательное для выполнения лицом, получившим доступ к определенной информации, требование не передавать такую информацию третьим лицам без согласия ее обладателя.

3.9. **Доступность информации:** требование, обязательное для соблюдения владельцем СИПЖЦП, выполнение которого обеспечивает пра-

вомочным способом своевременный и надежный доступ к интерпретируемой в соответствии с определенной моделью информации о продукции и/или к функциональным возможностям СИПЖЦП.

3.10. **Целостность информации:** требование, обязательное для соблюдения владельцем СИПЖЦП, выполнение которого обеспечивает защиту информации от модификации, подмены и уничтожения неправомочным способом.

3.11. **Требования безопасности информации, обрабатываемой СИПЖЦП:** требования, выполнение которых обеспечивает конфиденциальность, целостность и доступность обрабатываемой СИПЖЦП информации о продукции на протяжении всех этапов ЖЦП.

3.12. **Функциональные требования:** требования, определяющие уровень функциональных возможностей СИПЖЦП, обеспечивающих безопасность обрабатываемой информации о продукции.

3.13. **Требования доверия:** требования, определяющие уровень уверенности в корректности и эффективности реализации функциональных возможностей СИПЖЦП.

3.14. **Владелец СИПЖЦП:** субъект, осуществляющий владение и пользование СИПЖЦП и реализующий право распоряжения в пределах, установленных договором между ним и собственником.

3.15. **Собственник СИПЖЦП:** субъект, в полном объеме реализующий право владения, пользования, распоряжения СИПЖЦП.

3.16. **Специальные средства информационной поддержки жизненного цикла продукции:** средства информационной поддержки жизненного цикла продукции, соответствующие установленным требованиям безопасности информации и предназначенные для обработки информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну.

4. Основные положения

4.1. Требования настоящего стандарта, применяемые участниками обеспечения жизненного цикла продукции с целью обеспечения безопасности обрабатываемой СИПЖЦП информации о продукции, предъявляются также к самим СИПЖЦП.

4.2. К программным средствам информационной поддержки жизненного цикла продукции относят: общесистемные средства (операционные системы, драйверы, системы управления базами данных, средства защиты информации и средства их реализации) и прикладные средства (средства управления предприятиями и средства управления жизненным циклом продукции).

К аппаратным средствам информационной поддержки жизненного цикла продукции относят средства вычислительной техники, сетевое оборудование.

К защищаемым ресурсам относят структуру и содержание информации о продукции на всех этапах ее жизненного цикла, а также СИПЖЦП.

Структура информации описывается системой информационных моделей, классификация которых приведена в таблице.

4.3. Угрозы защищаемым ресурсам подразделяют на следующие основные группы:

— угрозы, связанные с осуществлением несанкционированного доступа к информации, содержащей сведения о продукции, при ее обработке и хранении;

— угрозы, связанные с несанкционированным копированием информации, содержащей сведения о продукции;

— угрозы, связанные с перехватом информации, содержащей сведения о продукции, из каналов передачи данных с использованием специализированных программно-технических средств;

— угрозы, связанные с нарушением целостности информации, содержащей сведения о продукции, вследствие сбоев (отказов) программного и аппаратного обеспечения;

— угрозы, связанные с отсутствием санкционированного доступа к информации о продукции для участников обеспечения жизненного цикла продукции;

— угрозы, связанные с нарушением доступности и целостности СИПЖЦП.

5. Общие требования

5.1. Аппаратные средства информационной поддержки жизненного цикла продукции должны соответствовать требованиям по защите информации ограниченного доступа от утечки по техническим каналам.

5.2. Требования безопасности информации к СИПЖЦП должны включать в себя функциональные требования и требования доверия.

5.3. Функциональные требования должны включать требования:

— к аудиту безопасности;

— к идентификации и аутентификации субъектов доступа;

— к управлению доступом;

— к обеспечению доступности используемых ресурсов.

5.4. СИПЖЦП должны обеспечивать:

— регистрацию событий, которые потенциально могут являться признаками реализации видов угроз в соответствии с п. 4.3;

Предметная область информации	Этапы ЖЦП				
	Маркетинг	Проектирование и разработка продукции, планирование и разработка процессов закупки	Производство или предоставление услуг, упаковка и хранение	Реализация	Установка и ввод в эксплуатацию, техническое обслуживание, эксплуатация, утилизация
Информация о продукции (изделии)	Маркетинговая модель продукции (модель требований)	Конструкторская модель продукции	Производственно-технологическая модель продукции	Сбытовая модель продукции	Эксплуатационная модель изделия
Информация о процессах, происходящих в ходе ЖЦП	Модель процессов маркетинга	Модель процессов проектирования, разработки, планирования, закупок	Модель процессов производства	Модель процессов продаж	Модель процессов эксплуатации, обслуживания и утилизации
Информация о среде, в которой реализуются соответствующие стадии ЖЦП	Модели рынка и его сегментов	Модель инженерно-управленческой среды	Модель производственно-технологической среды	Модели рынка и его сегментов	Модель эксплуатационной среды, среды утилизации

— проверку подлинности субъектов доступа (пользователей, программных процессов), участвующих в обработке информации о продукции;

— управление доступом субъектов, допущенных к обработке информации о продукции, в соответствии с их полномочиями;

— возможность восстановления информации о продукции при сбоях и отказах программно-аппаратных средств;

— гарантированный доступ к информации о продукции на всех этапах ее жизненного цикла.

5.5. Порядок задания и конкретизация содержания требований п. 5.4 к СИПЖЦП определяются в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2.

5.6. Требования доверия к СИПЖЦП должны включать требования к:

— безопасности разработки;

— методическому и инструментальному обеспечению разработки;

— мерам и процедурам устранения ошибок в СИПЖЦП;

— проектной документации;

— управлению конфигурацией;

— эксплуатационным документам;

— функциональному тестированию;

— поставке и вводу в эксплуатацию.

5.7. Для обеспечения требований безопасности разработки в комплект СИПЖЦП должны входить документы по безопасности разработки, содержащие описание методов и среды разработки. Описание среды разработки должно включать в себя описание всех опций инструментальных средств, от которых зависит реализация СИПЖЦП.

5.8. Для обеспечения требований по устранению выявленных в процессе эксплуатации ошибок в комплект СИПЖЦП должны входить документы с описанием процедур устранения ошибок в СИПЖЦП.

5.8.1. Документы с описанием процедур устранения ошибок в СИПЖЦП должны содержать:

— описание процедур, используемых при устранении ошибок в каждой версии (редакции, выпуске) СИПЖЦП;

— руководства по внесению исправлений в СИПЖЦП, описание механизмов, используемых для предоставления потребителям СИПЖЦП информации об ошибках и исправлениях;

— описание ошибок и исправлений в СИПЖЦП, признаков их проявления, а также степени завершенности исправлений;

— описание процедуры установления контактов потребителей с разработчиками (производителями) СИПЖЦП;

— описание процедуры приема и обработки информации об ошибках и исправлениях в СИПЖЦП.

5.8.2. Процедуры устранения ошибок и внесения исправлений в СИПЖЦП должны включать в себя процедуры уведомления зарегистрированных потребителей и исправления ошибок оперативными методами.

5.9. Для обеспечения выполнения требований к проектной документации в состав проектной документации должна входить функциональная спецификация, содержащая описание всех функций СИПЖЦП и их внешних интерфейсов, описание всех базовых аппаратных, программно-аппаратных и/или программных средств (платформ), необходимых для выполнения функций СИПЖЦП.

5.10. Для обеспечения выполнения требований к управлению конфигурацией СИПЖЦП должны маркироваться специальными знаками. Маркировка должна быть уникальной для каждой версии (редакции, выпуска) СИПЖЦП. Разработчиком СИПЖЦП должен быть организован строгий учет специальных знаков. Документы по управлению конфигурацией должны содержать описание мер и процедур, обеспечивающих внесение только санкционированных изменений в СИПЖЦП.

5.11. Для обеспечения выполнения требований к эксплуатационным документам в их состав должны входить руководство администратора и руководство пользователя.

5.11.1. Руководство администратора должно включать в себя описание:

— функций СИПЖЦП, выполняемых администратором, и правил их настройки;

— условий применения СИПЖЦП;

— процедур установки (при необходимости — генерации) и запуска СИПЖЦП;

— контролируемых администратором параметров СИПЖЦП и их значений.

5.11.2. Руководство пользователя должно включать в себя описание:

— функций, доступных пользователям;

— ограничений на применение функций, доступных для пользователей;

— процедур установки (при необходимости — генерации) и запуска СИПЖЦП;

— условий применения СИПЖЦП.

5.12. Для обеспечения требований к функциональному тестированию СИПЖЦП в тестовых документах должно быть приведено описание тестов, процедур и результатов тестирования.

5.13. В состав требований доверия к СИПЖЦП должны быть включены требования к их поставке и вводу в эксплуатацию.

5.13.1. Организация поставки должна включать в себя процедуры обеспечения безопасности при передаче СИПЖЦП от производителя собственнику (владельцу).

5.13.2. Процедуры обеспечения безопасности должны предусматривать передачу от производителя собственнику (владельцу) описания процедур установки, генерации и запуска СИПЖЦП.

5.13.3. Процедуры обеспечения безопасности при передаче СИПЖЦП от производителя собственнику должны, при наличии требований безопасности информации, предусматривать порядок предоставления/передачи исходных текстов программных средств.

5.14. Порядок задания и конкретизация содержания требований п. 5.7—5.13 определяются в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3.

5.15. Для обработки информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну, применяют специальные СИПЖЦП.

5.16. Специальные СИПЖЦП должны соответствовать требованиям, заданным в п. 5.7—5.13, и, кроме того, подвергаться контролю, включая проверку отсутствия недекларированных возможностей, в соответствии с требованиями правомерно принятых нормативных документов федеральных органов исполнительной власти.

Результаты контроля должны быть включены в состав документов по безопасности разработки специальных СИПЖЦП.

5.17. В случае использования криптографических средств (шифровальных, имитозащиты, электронной цифровой подписи) для обеспечения безопасности информации необходимо руководствоваться требованиями правомерно принятых нормативных документов федеральных органов исполнительной власти.

Ссылка на данный материал как официальный документ не допускается

В. В. КЛОЧКОВ, канд. техн. наук, Д. И. САЗОНОВ, аспирант
Московский физико-технический институт

Экономические проблемы организации виртуальных машиностроительных предприятий

Благодаря широкому распространению современных информационных технологий в промышленности развитых стран мира складываются новые виды организационных структур, в частности так называемые виртуальные предприятия или виртуальные производственные объединения (IVE, Industrial Virtual Enterprise, т. е. виртуальное производственное предприятие), см., например, [1—5]. Виртуальное производственное объединение, как правило, состоит из агентов — специализированных предприятий, выпускающих комплектующие изделия или производственные услуги, и головного предприятия — носителя бренда и системного интегратора продукции агентов, состав которых периодически меняется.

Следует отметить, что такое объединение является добровольным и не предполагает жесткого закрепления связей между предприятиями. Члены объединения связаны лишь общими экономическими интересами, а также единой информационной средой, содержащей в цифровой форме данные об изделии. Типичная структура отрасли при наличии в ней виртуальных объединений приведена на рис. 1.

Для образования в отрасли виртуальных предприятий необходимо выполнение, по меньшей мере, двух условий:

— необходимо повсеместное внедрение на предприятиях отрасли CALS-технологий [6, 7], позволяющих всем участникам жизненного цикла изделий (разработчикам, производителям, эксплуатирующим и ремонтным организациям) обмениваться в реальном масштабе времени данными об изделиях в цифровой форме. В свою очередь, данные об изделиях включают в себя следующую информацию: о конструкции изделий данного типа, технологии их производства и обслуживания, а также конфигурации и техническом состоянии;

— необходимо наличие потенциальных агентов, т. е. специализированных предприятий-поставщиков различных комплектующих изделий и производственных услуг. Потенциальных предприятий-поставщиков комплектующих изделий и производственных услуг каждого вида должно быть несколько, чтобы головные предприятия имели возможность выбора. Заметим, что структура большинства отраслей отечественной промышленности в настоящее время существенно отличается от матричной структуры на рис. 1. Напротив, большинство машиностроительных предприятий стремятся организовать полный цикл производства конечного продукта (в том числе и путем жесткой вертикальной интеграции производителей всех комплектующих изделий). Уровень специализации существенно ниже достигнутого в советскую эпоху. Причинами такого положения можно считать разрушение хозяйственных связей между предприятиями, кризис неплатежей 1990-х гг., недобросовестное поведение предприятий-смежников и т. п.

Преимущества организации виртуальных предприятий

В общем случае образование виртуальных предприятий предоставляет следующие благоприятные возможности:

- быструю разработку и освоение серийного производства сложных изделий с использованием ключевых компетенций ведущих специализированных предприятий всего мира;
- гибкую смену поставщиков для удовлетворения динамично изменяющегося спроса на готовые изделия в той или иной конфигурации (flexible production) и для

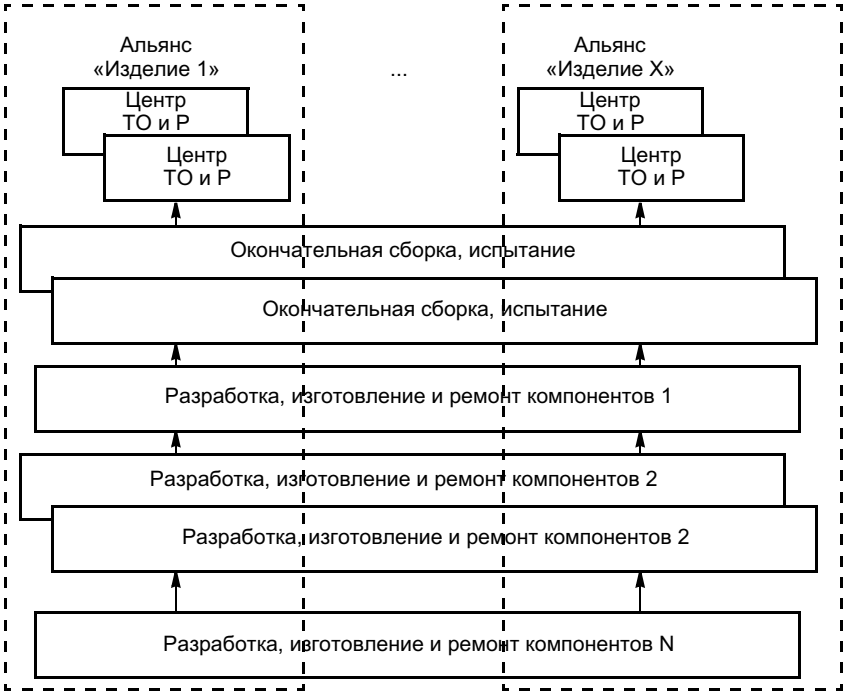


Рис. 1. Матричная структура отрасли и виртуальные предприятия

минимизации материальных затрат при заданном уровне качества комплектующих и производственных услуг.

На стадии серийного производства наиболее существенными являются два последних фактора, которые, в свою очередь, по-разному проявляются в различных отраслях промышленности.

Приведем несколько примеров, где часто возникает необходимость гибкого изменения конфигурации сложных изделий.

1. Промышленная сборка персональных компьютеров по индивидуальным заказам. Пионером в этой области выступила компания Dell (США), но в настоящее время это становится все более распространенной стратегией.

2. Автомобилестроение. Каждый автомобиль относительно дорогих моделей в настоящее время собирается под заказ, в индивидуальной комплектации. Причем выбор заказчика может охватывать сотни позиций — тип двигателя и трансмиссии, наличие либо отсутствие многочисленных видов дополнительного оборудования и т. п., по некоторым из которых возможны десятки вариантов выбора (например, цветовое оформление и материал обивки салона).

3. Аэрокосмическое приборостроение. Состав и характеристики комплекса бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) могут быть различными при поставках авиатехники в различные страны либо при применении в тех или иных целях. Например, грузовой самолет может использоваться в качестве транспортно-десантного, поисково-спасательного либо только для перевозки грузов гражданского назначения. В зависимости от этого может потребоваться наличие в составе комплекса БРЭО прицельного оборудования, радиолокационной станции обзора земной поверхности, аппаратуры опознавания "свой — чужой" и т. п.

4. Самолетостроение. Изменения, вносимые в конфигурацию самолета в процессе его финальной сборки, могут касаться компоновки и оборудования пассажирских салонов, конфигурации устанавливаемого комплекса БРЭО, типов авиадвигателей.

Что касается авиационного двигателестроения, безусловно, и в этой подотрасли авиационной промышленности формирование виртуальных предприятий может быть целесообразным. Но основной предпосылкой к их формированию в данном случае является не столько возможность гибкого изменения конфигурации изделий (в силу конструктивных особенностей авиационных газотурбинных двигателей такое изменение практически невозможно), сколько возможность гибкой смены поставщиков отдельных компонентов авиадвигателей с целью снижения закупочных цен при заданном уровне качества. Возможность снижения закупочных цен весьма важна для головного предприятия, работающего по принципу аутсорсинга. Поскольку основной статьей его затрат являются материальные затраты на закупку комплектующих изделий и производственных услуг, произведенных независимыми предприятиями-агентами, даже небольшое снижение закупочных цен может привести к значительному повышению прибыли виртуального предприятия. На этот эффект обращали внимание и другие исследователи [8]. Рассмотрим следующий наглядный пример. Предположим, что стоимость покупных комплектующих изделий составляет хотя бы 50 % себестоимости продукции. Заметим, что для системного интегратора, закупающего все комплектующие изделия и услуги у поставщиков и подрядчиков, доля материальных затрат в себестоимости может быть значительно выше. Пусть известно, что сложившаяся рыночная цена готового изделия изначально превышала себестоимость на 10 %. Тогда снижение закупочных затрат всего лишь на 1 % увеличивает прибыль альянса от реализации продукции приблизительно на 5 %! Таким образом, малозначительный на первый взгляд эффект снижения материальных затрат виртуального предприятия при использовании активной закупочной стратегии следует признать существенным, а в некоторых ситуациях — даже определяющим.

Несмотря на то, что в работе перечислены лишь отрасли промышленности, которые традиционно принято относить к высокотехнологичным, виртуальные предприятия создаются и в других отраслях.

Оценка экономической эффективности гибкого изменения состава объединений

Эффект снижения материальных затрат за счет гибкой смены агентов

Моделирование гибкой закупочной политики головного предприятия альянса возможно в рамках следующего подхода [9]. Предположим, отпускные цены поставщиков изменяются независимо случайным образом, причем принимают высокое значение $p^{\text{выс}}$, в среднем на период $T^{\text{выс}}$, а низкое значение $p^{\text{низк}}$ — в среднем на период $T^{\text{низк}}$ (в рамках такого "ценового" подхода можно моделировать и колебания качества продукции поставщиков). Периоды повышения и понижения цен чередуются. Для упрощения рассуждений будем считать, что в каждый момент времени головному предприятию достаточно иметь лишь одного — наивыгоднейшего — поставщика комплектующих изделий или производственных услуг каждого вида. Средняя цена комплектующих или производственных услуг данного вида, закупаемых постоянно у одного и того же поставщика,

$$\bar{p}^{\text{пассив}} = \frac{p^{\text{выс}} T^{\text{выс}} + p^{\text{низк}} T^{\text{низк}}}{T^{\text{выс}} + T^{\text{низк}}}, \qquad (1)$$

а если бы головному предприятию удавалось в каждый момент времени выбирать наивыгоднейшего поставщика, средняя цена

$$\bar{p}^{\text{идеал}} = p^{\text{выс}} \left(\frac{T^{\text{выс}}}{T^{\text{низк}} + T^{\text{выс}}} \right)^n + p^{\text{низк}} \left[1 - \left(\frac{T^{\text{выс}}}{T^{\text{низк}} + T^{\text{выс}}} \right)^n \right]. \qquad (2)$$

В реальности смена поставщиков требует значительных затрат средств и времени. Введем следующие показатели гибкости организационной структуры: $h^{\text{см}}$ — единовременные затраты средств на смену поставщика; $\tau^{\text{см}}$ — характерное время, необходимое для смены поставщика.

Суммарные затраты и потери, связанные с каждой сменой поставщика, можно выразить следующим образом:

$$c^{см} = h^{см} + \tau^{см}\Delta pq.$$

Эти величины значительно уменьшаются благодаря внедрению CALS-технологий, чему способствуют следующие факторы:

- разработка конструкторско-технологической, ремонтной, эксплуатационной документации в электронном виде;
- свободный обмен между разработчиками и серийными изготовителями изделий всей необходимой информацией по глобальным компьютерным сетям в рамках единого информационного пространства;
- автоматизация процессов технологической подготовки производства (в частности автоматизированная переналадка гибких производственных комплексов с числовым программным управлением) и т. д.

Годовая частота смены поставщиков $m^{см}$ может быть оценена на основе модели, в которой система поставщиков представлена в виде замкнутой системы массового обслуживания [9]. Фактическая среднегодовая закупочная цена комплектующих или услуг (при активной стратегии)

$$\bar{p}^{факт} = \bar{p}^{идеал} + \frac{m^{см}c^{см}}{q}. \qquad (3)$$

Предлагается использовать следующий интегральный показатель эффективности гибкой стратегии смены поставщиков (т. е. показатель эффективности организации виртуального предприятия):

$$\gamma = \frac{\bar{p}^{факт} - \bar{p}^{идеал}}{\bar{p}^{пассив} - \bar{p}^{идеал}}. \qquad (4)$$

Если эта величина близка к 1, активная смена поставщиков бессмысленна и более предпочтительной становится жесткая вертикальная интеграция. Напротив, если $\gamma \ll 1$, организация виртуального предприятия может быть целесообразной.

Зависимость на рис. 2	*1*	*2*	*3*	*4*
$T^{низк}$, год	0,5	1,0	0,5	1,0
$T^{выс}$, год	0,5	0,5	1,0	1,0

Для иллюстрации применения предлагаемого подхода рассмотрим следующий пример: $p^{выс}$ = 1,2 млн долл., $p^{низк}$ = 1 млн долл., q = 100 единиц в год, $h^{см}$ = 0,5 млн долл., число потенциальных поставщиков комплектующих изделий данного вида — 4. На рис. 2 приведены полученные в рамках данного примера зависимости эффективности виртуального предприятия от среднего времени смены поставщика при различной динамике изменения отпускных цен (см. таблицу).

Можно заметить, что существуют некоторые пороговые значения показателей гибкости организационной структуры виртуального предприятия $h^{см}$ и $\tau^{см}$, при которых преимущества виртуального предприятия теряются (т. е. $\gamma \approx 1$). Таким образом, организации виртуальных производственных объединений в российской промышленности должно предшествовать достижение отдельными предприятиями необходимого организационного и технического уровней.

Качественный анализ разработанной модели показывает, что эффективность активного изменения состава виртуального предприятия, образованного при помощи CALS-технологий, повышается, если:

- возрастают относительная амплитуда колебаний цен предложения поставщиков и их характерный период;
- снижаются затраты средств и времени на смену поставщика;
- увеличивается объем закупки комплектующих и услуг.

На рис. 3 приведена полученная в рамках приведенного примера зависимость показателя эффективности от годового объема закупок, т. е. фактически от масштаба производства.

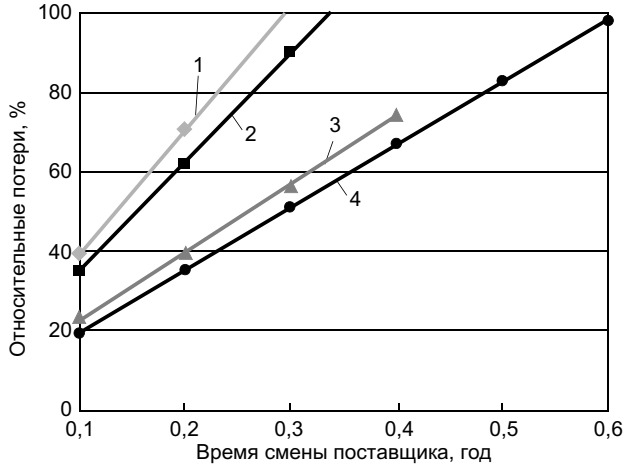


Рис. 2. Зависимость эффективности активной смены поставщиков от средней продолжительности смены поставщика: *1—4* — см. таблицу

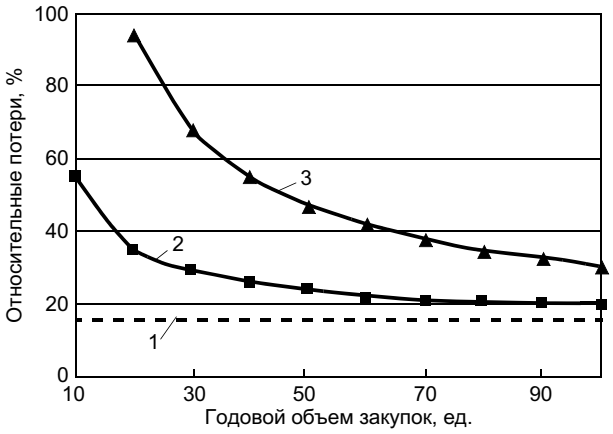


Рис. 3. Зависимость эффективности активной смены поставщиков от объема закупок комплектующих ($T^{выс} = T^{низк} = 1$ год, $\tau^{см} = 0{,}1$ года): *1—3* — *h* равен 0, 0,5 и 2 соответственно

Как видно на рис. 3, крупные заказчики по сравнению с мелкими более заинтересованы в активном поиске наивыгоднейших партнеров. С другой стороны, внедрение CALS-технологий позволяет и более мелким заказчикам пользоваться благоприятными возможностями закупки комплектующих изделий по низким ценам.

Сокращение времени и снижение стоимости смены поставщиков при внедрении CALS-технологий способны значительно смягчить для головного предприятия последствия срыва поставок комплектующих по тем или иным причинам, в том числе из-за недобросовестности поставщиков. Отчасти эти факторы (проблема "смежников") и заставляют предприятия в переходных экономиках прибегать к жесткой вертикальной интеграции. Повышенная гибкость, обретенная благодаря CALS-технологиям, позволяет виртуальному предприятию существовать и устойчиво функционировать даже при наличии контрактных проблем, несмотря на отсутствие жесткого формального закрепления вертикальных связей. Таким образом, именно CALS-технологии открывают путь к массовому образованию в российской промышленности "мягких" альянсов предприятий (см. рис. 1).

При массовом применении предлагаемых активных стратегий смены поставщиков производители изделий смогут закупать большую долю комплектующих и производственных услуг по относительно низким ценам. Напротив, в периоды повышения цен поставщикам все труднее будет удержать заказчиков. Следовательно, средние закупочные цены на комплектующие изделия, работы и услуги производственного назначения будут снижаться, как и амплитуда их изменения. То же самое касается и уровня дефектности комплектующих изделий, а также частоты нарушения ритмичности поставок. Таким образом, широкое распространение CALS-технологий значительно усиливает конкуренцию на рынках комплектующих изделий и производственных услуг. Описанная выше модель может быть усовершенствована. Прежде всего можно учесть возможность закупки комплектующих изделий и услуг не у единственного "наилучшего" поставщика, а у нескольких — с целью снижения риска срыва поставок и связанных с этим потерь. Также может быть учтен эффект обучения поставщиков и заказчиков в процессе совместной работы, приводящий к снижению затрат и рисков. Кроме того, в приведенной модели процесс оптимизации состава объединения рассмотрен с позиций системного интегратора, производителя финальных изделий. В то же время в последние годы все больше предприятий российской авиационной промышленности включается в глобальную кооперацию, участвуя в разработке и производстве зарубежных самолетов и авиадвигателей именно в качестве специализированных поставщиков отдельных узлов, комплектующих изделий, материалов, производственных услуг или НИОКР. Поэтому не менее актуален анализ экономических проблем предприятий-агентов виртуальных производственных объединений, а также оптимизация их производственной и маркетинговой политики.

Эффект гибкого удовлетворения меняющегося спроса

Гибкость структуры позволяет виртуальным предприятиям более оперативно реагировать на меняющиеся запросы потребителей, осуществляя фактически производство изделий по индивидуальным заказам, оперативную модернизацию конструкций. Виртуальные предприятия можно создавать под конкретный проект или даже единичный заказ, что уже произвело революцию в сфере маркетинга и менеджмента качества. Образование виртуальных предприятий позволяет совместить преимущества массового высокоавтоматизированного производства с удовлетворением индивидуализированного спроса.

Экономико-математическое моделирование гибкого изменения конфигурации изделий, выпускаемых виртуальным предприятием, возможно в рамках следующего подхода. Предположим, что готовое изделие может быть поставлено в различных конфигурациях (исполнениях), которые обозначены индексами $k = 0, 1, ..., l$ в порядке возрастания сложности. При этом $k = 0$ соответствует так называемой базовой комплектации изделия — наиболее дешевой и распространенной. Спрос на различные варианты исполнения изделий возникает случайным образом с вероятностями $f_k \left(\sum_{k=0}^{l} f_k = 1 \right)$. Предположим, что клиенты готовы заплатить за готовое изделие строго в заданной конфигурации премию ("надбавку за срочность" и индивидуальность заказа), которая убывает со временем t, прошедшим с момента получения заказа, по известному закону $\Delta p_k(t)$. Убывание премии связано со следующими факторами:

— заказ может быть передан конкурентам;

— срочность исполнения повышает привлекательность изделия для заказчика.

Предположим, что длительность изготовления изделия в k-й комплектации равна $t(k)$. Предприятие может выбрать одну из двух альтернативных стратегий:

- вести производство изделий исключительно в базовой комплектации;
- перейти на гибкое удовлетворение индивидуальных заказов, что потребует дополнительных постоянных затрат $\Delta FC_{\text{гибк}}$ на обеспечение гибкости производства (внедрение CALS-технологий, а также гибких производственных систем).

Таким образом, переход к производству изделий по индивидуальным заказам по сравнению с выпуском изделий в базовой комплектации приводит к следующему изменению прибыли:

$$\Delta П = q \sum_{k=0}^{l} \{f_k \Delta p_k[t(k)]\} - \Delta FC_{\text{гибк}}, \qquad (5)$$

где q — суммарный объем выпуска изделий.

Заметим, что описанное изменение прибыли может оказаться отрицательным, если:

- относительно мал спрос на изделия в индивидуальном исполнении — как в натуральном выражении ($f_k \ll f_0$, $k = 1, 2, ..., l$), так и в стоимостном (т. е. $\Delta p_k(t)$ невелико и быстро убывает со временем);

- мал суммарный объем выпуска изделий q и/или велики постоянные затраты на обеспечение гибкости производства $\Delta FC_{\text{гибк}}$;
- велика длительность исполнения сложных заказов $\{t(k)\}$.

Все эти факторы могут привести к тому, что предприятие выберет традиционную стратегию массового производства изделий в базовой комплектации. Однако существенно меньшие сроки поставки изделий в сложных конфигурациях $\{t(k)\}$ позволят виртуальным предприятиям, созданным на основе CALS-технологий, исполнять более сложные заказы и, как следствие, — сохранять конкурентоспособность и получать бóльшую прибыль в условиях индивидуализации спроса.

ВЫВОДЫ

1. Основными источниками экономического эффекта организации виртуальных предприятий являются возможность удовлетворения индивидуального спроса при сохранении преимуществ массового производства и возможность снижения закупочных цен и дефектности комплектующих изделий и производственных услуг за счет гибкой смены их поставщиков.

2. Гибкое изменение состава виртуального предприятия определяется интегральными технико-экономическими параметрами: суммарными затратами средств и времени на освоение производства предприятиями-агентами потребных комплектующих или производственных услуг, а также на изменение параметров выпускаемых комплектующих или производственных услуг (т. е. на переналадку оборудования).

3. Преимущества виртуальных предприятий перед традиционной жесткой вертикальной интеграцией могут проявиться только при достижении некоторого порогового уровня гибкости информационных систем и производственного оборудования.

4. Массовое внедрение CALS-технологий в промышленности может привести к кардинальным изменениям рыночной конъюнктуры, организационных структур предприятий и отраслей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасов В. Б.* Предприятия XXI века: проблемы проектирования и управления // Автоматизация проектирования. 1998, № 4 (10). С. 45—52.
2. *Тарасов В. Б.* Причины возникновения и особенности организации предприятия нового типа // Проблемы теории и практики управления. 1998. № 1. С. 87—90.
3. *Davidow W., Malone M.* The virtual corporation: structuring and revitalizing the corporation for the XXI century. N. Y.: Harper Business, 1992. 294 p.
4. *Goldman S. L., Nagel R. N., Preiss K.* Agile competitors and virtual organizations: strategies for enriching the customer. N. Y.: Van Nostrand Reinhold, 1995. 400 p.
5. *Katzy B., Zhang C., Loeh H.* Reference Models of Virtual Organizations // Center for Technology and Innovation Management (CeTIM). Working Paper 2704. 2005, 22 p.
6. *Клочков В. В.* Организационно-экономические аспекты внедрения CALS-технологий в авиационном двигателестроении // Технология машиностроения. 2006. № 5. С. 81—86.
7. *CALS* (непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции) в авиастроении / Под ред. А. Г. Братухина. М.: МАИ, 2002. 304 с.
8. *Сивохина Н. П.* Организация закупок материальных ресурсов // Новые материалы и технологии. М.: МАТИ, 2004. С. 40—41.
9. *Клочков В. В.* Организация конкурентоспособного производства и послепродажного обслуживания авиадвигателей. М.: Экономика и финансы, 2006. 464 с.

Ю. Б. ЯРХОВ, доцент, Е. В. ГАЛЕТКО, студентка
Сарапульский политехнический институт –
филиал Ижевского государственного технического университета

Управление качеством продукции и трудовыми ресурсами

Будущее вступление России в ВТО выдвигает задачу повышения конкурентоспособности отечественной продукции, и главным фактором обеспечения конкурентоспособности, как показывает мировой опыт, выступает качество продукции. Во всем комплексе современных мероприятий по повышению качества автомобилей, которые должны учитывать мировые тенденции повышения качества комплектующих, разработку национальных стандартов, гармонизированных с международными стандартами серии ИСО 9000 и национальными стандартами развитых стран, добровольную сертификацию систем качества предприятий — поставщиков автомобильной продукции, не принимается во внимание, что ведущие страны — производители автомобилей (Япония, США, Германия Франция, Италия и др.) создали прежде всего конкурентоспособную, качественную конструкцию автомобиля. Эти же страны производят до 36 млн автомобилей в год (в России около 1 млн 200 тыс. шт.) и в перспективе к 2015 г. производство может составить до 2—3 млн шт., в т. ч. сборка иномарок — свыше 1 млн шт. Производством такой конкурентной продукции (конструкции) как за рубежом, так и в нашей стране занимаются технологи и производственники, но зарубежные фирмы уделяют особое внимание управлению трудовыми ресурсами, повышению их качества, рассматривая их как потребителей продукции.

В публикациях по качеству и управлению качеством машиностроительной продукции, в т. ч. автомобилей, ав-

торы [1—7] обходят эту проблему, как требующую больших инвестиций. Последние в настоящее время являются основной и сложной проблемой. В том, что "пути достижения конкретного качества заключаются в создании и экспериментальной обработке высокотехнологичной и наукоемкой машиностроительной продукции, разработке высокоэффективных технологий, применении автоматизированного и надежного оборудования, высококачественного сырья, эффективных конструкционных материалов, современной комплектации и все это требует больших финансовых вложении", они единодушны. А по данным Госкомстата РФ, 65 % технологического оборудования морально и физически устарело, темпы обновления научно-технической базы в машиностроении в финансовом выражении составляют не более 5 % в год, в физическом — не превышают 2,5 %. И сразу же делаются предложения по применению относительно малозатратных механизмов обеспечения качества — современной организации производства и передового менеджмента. Недорогой путь к качеству — обучать, готовить персонал, сделать его наиболее заинтересованным в борьбе за качество и привлечь к управлению не менее 25 млн профессиональных менеджеров. Только вот как сделать из неконкурентоспособной конструкции автомобиля или других изделий на устаревшем оборудовании качественную продукцию, удовлетворяющую мировым образцам, авторы не объясняют.

Концепция Правительства РФ развития автомобильной промышленности, предусматривающая создание заводов по сборке иномарок и замене отечественных моделей автомобилей на сборку иномарок типа "KIA Spectra" на ОАО "ИжАвто" и др., обусловливает окончательную деградацию отечественного станкостроения, которое находится на 23-м месте (данные Gardner Publications, Inc. за 2003—2004 гг.) по производству станков, и, как следствие, — технологии механической обработки деталей. Мы уже лишились таких уникальных заводов, как Ярцевский завод дизельных двигателей в Смоленской обл., АМО "ЗИЛ", включавший чугунно-литейное производство на 400 000 т литья в год и моторное производство 150 000 дизельных двигателей в год, АЗЛК после последних перед перестройкой реконструкций.

Поэтому необходимо создавать отечественные образцы конкурентоспособных и качественных автомобилей и других изделий, а для этого восстановить и укрепить молодым персоналом проектировщиков конструкторские отделы предприятий и научно-исследовательских институтов, восстановить и обновить экспериментальную базу, восстановить станкоинструментальную промышленность до уровня, который она занимала (третье—пятое место в мире, а станки и автоматические линии не уступали лучшим мировым образцам). Высшие и средние специальные учебные заведения выпускают еще достаточное количество молодых специалистов по проектированию современных конструкций, технологий с применением САПР, вычислительной и компьютерной техники. Необходимо обеспечить их достойными работой и заработной платой. В условиях обостряющейся конкуренции для производителей (поставщиков) актуальной проблемой становится необходимость постоянно убеждать потребителя, клиента, заказчика, что качество выпускаемой продукции или оказываемой услуги полностью отвечает их запросам и ожиданиям, используя печатные издания и СМИ.

Другим условием повышения качества выпускаемой продукции является повышение качества человека. В человеке заключено такое количество ресурсов, при раскрытии и управлении которыми можно достичь высоких производительности и качества работы. Более столетия научное психологическое знание о труде и трудящихся используется для того, чтобы оптимизировать решение задач предприятий. Направленность психологических исследований, востребованных обществом в сфере хозяйственной деятельности, зависела от особенностей общественно-политической обстановки и исповедуемых на конкретных исторических этапах управленческих концепций. Главные выразители человеческих отношений и человеческих ресурсов — М. Фоллей, Э. Мэйо в 1927—32 гг. пришли к выводу о том, что для работника сам производственный процесс с его чисто физическими требованиями имеет меньшее значение, чем социальное и психологическое положение работника. Этот подход к определению роли человеческого фактора и человеческого ресурса на производстве сформировал запрос на социально-психологические исследования, в том числе рассматривающие малые социальные группы, феномен власти, лидерство, мотивацию, психологические предпосылки дисфункциональных конфликтов на предприятии, стили управления и т. п. Однако за последние годы рост образовательного уровня населения, внедрение в производство вычислительной техники и на ее основе автоматизации повысили роль производственных процессов. Работать в чистых, светлых, бесшумных помещениях с "думающими" машинами стало интереснее, чем при монотонном, однообразном труде. Такими заводами, построенными в СССР, стали Волжский и Камский автозаводы, ЗИЛ, АЗЛК.

Но воспитание образованного, бережливого, честного, культурного, интеллектуального человека, способного раскрыть свои ресурсы и относящегося к производству, как к своему личному предприятию, является актуальной задачей для всех общественно-политических эпох.

Достижения отечественной психотехники были признаны в мировом научном сообществе и конкретно проводились на предприятиях при внедрении следующих мероприятий:

- стабилизация трудового коллектива путем адаптации молодых рабочих и совершенствования социально-психологического климата;
- аттестация, обучение руководителей, создание резерва инженерно-технических работников;
- профориентация школьников;
- развитие социальной активности персонала;
- обучение персонала в различных кружках (экономических, политических, качества и др.);
- совершенствование систем управления;
- оптимизация психофизиологического состояния персонала. Принципы управления "человеческими ресурсами" с точки зрения социально-психологических исследований основаны на следующем:
- подчеркивать уважение к индивидуальности и ценности каждого человека путем поощрения высокой про-

изводительности в доброжелательной и стимулирующей трудовую активность атмосфере;

- уважать права человека;
- поддерживать открытые и доверительные отношения и уважение работников друг к другу;
- нести ответственность за повышение квалификации персонала;
- предоставлять равные возможности для справедливой оплаты за хорошо и качественно выполненную работу, оценивать результаты производственной деятельности по достижению поставленной цели.

Высшее руководство японских фирм особенно внимательно следит за тем, чтобы было меньше внешних социальных различий между руководящим составом фирмы и рабочими. Поэтому весь персонал фирмы питается в одной и той же столовой, все работники фирмы носят одни и те же комбинезоны, руководство фирм убеждено в том, что проявление заботы о рабочих экономически выгодно и, наоборот, равнодушие — не выгодно. Руководство японских фирм проявляет такие формы заботы о рабочих, как устройство спортивных залов, плавательных бассейнов, организация совместных экскурсий, массовых выездов за город с бесплатным питанием, бесплатных подарков к дням рождения, скидок на покупку автомобиля, дома и т. п.

Таким образом, руководство фирмы по отношению к рабочему выполняет роль "крестного отца" — оно гарантирует ему работу и заботится о нем. Фирма как бы является единой семьей — с четким распределением роли отцов и детей, а единой семье нельзя допускать дефектов и брака, так как каждый работает на себя и свою семью.

Еще один основополагающий принцип, обусловливающий психологическое обеспечение управления человеческими ресурсами, — это принцип социальной равноценности всех видов труда. В соответствии с ним проблемы как "белых", так и "синих воротничков" одинаково важны и требуют адекватного отношения со стороны специалистов по управлению человеческими ресурсами. Каждый участник производственного процесса должен понимать, что это необходимое звено, без которого качество общего результата не будет получено.

Особое внимание при психологическом обеспечении работы с человеческими ресурсами придается стимулам общеобразовательного уровня, культурного роста, морального и эстетического развития, а также удовлетворению культурных и социальных потребностей. Это позволит искоренить пьянство, сквернословие, воровство, засорение территорий, хулиганство, все еще развитые в нашем обществе. Воспитательная работа, направленная на нетерпимость к такого рода проявлениям, повышение целеустремленности, активности, требовательности к нарушителям, должна внедряться во всех организациях, в которых человек проходит путь от ребенка до зрелого человека. Тогда и на работе на предприятии он раскроет себя положительно, со всеми своими возможностями. Следовательно, человеческие ресурсы нужно осмысливать как человеческие возможности, а управление человеческими ресурсами — как управление человеческими возможностями. При такой трактовке рассматриваемого термина никакого уничижения личности не просматривается, а речь идет о всем том богатстве проявлений индивидуума, которое может быть востребовано при включении человека в организационную среду и трудовые процессы. Это его физические и психические усилия, знания, навыки, умения, интеллектуальное развитие, нравственный потенциал. Особенно значительное проявление человеческих возможностей происходит при высокой культуре труда.

Объективным показателем культуры труда являются технико-технологическая обеспеченность, обусловленная уровнем развития техники и технологии, организации производства и образующих систему требований к человеку как субъекту труда — исполнителю производственных функций и личности. Профессиональная культура в отличие от культуры труда определяет степень овладения трудящимися достижениями научно-технического и социального прогресса. Она является личностным аспектом культуры труда. Однако воспитание нравственных чувств — чувства долга, совести, чести, патриотизма — должно сочетаться с системой оплаты и вознаграждений работников. Наиболее популярны современные системы стимулирования — доля в прибылях, компенсация за участие в снижении издержек, выплаты за знание и компетенцию. Чем полнее все формы стимулирования охватывают актуальную для человека мотивацию, тем в большей степени повышаются его производительность и качество работы. Другим условием повышения роли человеческих ресурсов является удовлетворенность трудом, на которое влияют дополнительные факторы:

- общие (расстояние до предприятия, доступность транспортных средств, график работы, социальные льготы, в т. ч. детские учреждения, столовая, улучшение жилищных условий, приобретение квалификации, продвижение по службе и др.);
- физические условия труда (безопасность, риск профессиональных заболеваний и др.);
- содержание труда (монотонность, разнообразие, квалификация, творчество, проявление инициативы и др.);
- производственные отношения людей и руководителей.

Заключение

В целом повышение конкурентоспособности и качества изделий, в том числе автомобилей, зависит в первую очередь от создания конкурентоспособных конструкций на стадии проектирования. Если государство хочет иметь сильную автомобильную отрасль, то должно оказать финансовую поддержку прежде всего конструкторским организациям по проектированию автомобильной техники по международным стандартам серии ИСО 9000, а не ориентироваться на сборку иномарок. Сборка иномарок уже привела к стагнации станкостроительной промышленности, снижению внедрения новых технологий, особенно механической обработки деталей. Необходимо наращивать производство автомобилей собственной конкурентоспособной конструкции, восстановив мощности таких заводов, как ЗИЛ, КамАЗ, ГАЗ, АЗЛК и др.

В производстве качественной продукции необходимо поднять роль человеческого фактора и человеческих ресурсов как неиссякаемого источника роста производительности труда и качества изделий.

Воспитание нового поколения российских граждан позволит уменьшить, а возможно, и исключить проявления пьянства, воровства, хулиганства, захламления окружающей среды и т. п. и повысить культуру, чувство долга, совесть, честь, патриотизм россиян и использование человеческих ресурсов во благо общества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Добринский Е. С.* 13-я Международная автомобильная конференция. Российский автопром в 2004 г. Особенности и перспективы развития // Технология машиностроения. 2005. № 5. С. 87—100.
2. *Шумячер В. М., Бурлаченко О. В., Слышкин С. Н.* Технологическое обеспечение управления качеством машиностроительной продукции // Технология машиностроения. 2005. № 6. С. 73—75.
3. *Добринский Е. С.* "Российское качество" в системе повышения конкурентоспособности отечественного машиностроения // Технология машиностроения. 2005. № 6. С. 75—79.
4. *Добринский Е. С.* "Паблик Рилейшнз" конкурентоспособной наукоемкой технологической продукции // Технология машиностроения. 2005. № 7. С. 90—91.
5. *Добринский Е. С., Сеин В. А., Суслов Ан. А.* Прогрессивные технологии и материалы в автомобилестроении // Технология машиностроения. 2006. № 1. С. 88—100.
6. *Медарь А. В.* Общая методология технологического обеспечения качества изделий машиностроения в сборочном производстве // Технология машиностроения. 2006. № 2. С. 31—35.
7. *Ярхов Ю. Б., Кулемин В. Ю., Андреенков А. П.* Технология автоматизированного производства дизельного двигателя. Ижевск: ИжГТУ, 2006. 332 с.

Л. С. ОРСИК, д-р экон. наук, А. А. ФЕДОРОВ, аспирант
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Экспертные оценки для организации процесса управления инвестиционными ресурсами предприятия

Математическая модель управления инвестиционными ресурсами в производственно-финансовой сфере базируется на инвариантной по отношению к виду проекта процедуре определения типовой триады эффективного управления [1]:

— определение цели проекта с формализацией этой цели в виде критерия эффективности;

— определение управляемых переменных, изменение которых влияет на достижение поставленной цели;

— описание ограниченных ресурсов инвестиционного проекта, которые формализуются в виде системы ограничений задачи математического программирования.

Управление инвестициями является неотъемлемой частью экономической стратегии, представляющей собой форму управления процессами формирования, функционирования и развития системы промышленного производства.

Стратегическое управление системой промышленного производства — деятельность, направленная на реализацию долгосрочных перспективных планов развития и функционирования системы путем приведения ее структуры, количественных и качественных характеристик в соответствие с потребностями и условиями промышленного производства и обеспечения динамического баланса системы с внешней средой.

Стратегическое управление сводится к процедуре выработки и реализации управленческих решений, включающей несколько этапов:

— получение информации о ситуации в производстве и сфере его технического обеспечения — численности, организационно-правовых формах, экономическом положении объектов и субъектов технического обеспечения; объемах и условиях выполнения работ; численности, типоразмерной и возрастной структуре основных фондов, их техническом состоянии; численности и квалификации кадров; сюда же относится информация о видах, формах и объемах государственной поддержки предприятия; нормативно-правовых актах и других регламентах, относящихся к сфере технического обеспечения и др.;

— разработка общей концепции и основных направлений развития и функционирования системы промышленного производства;

— определение миссии системы промышленного производства;

— определение генеральных целей развития и функционирования системы промышленного производства (целей первого порядка);

— анализ среды с точки зрения ее влияния на достижение генеральных целей системы промышленного производства;

— прогноз развития ситуации;

— определение целей второго и более низких порядков;

— разработка стратегии развития и функционирования системы промышленного производства;

— разработка плана реализации стратегии;

— разработка механизмов реализации стратегии;

— поэтапная реализация стратегии;

— оценка эффективности конечных результатов реализации стратегии.

В основу выработки управленческих решений должны быть положены не строго формализованные, а эвристические подходы, в том числе экспертные оценки. Связано это с тем, что принимать решения приходится в условиях большой неопределенности развития ситуации в экономике страны. Поставленные задачи решаются поэтапно с назначением количественных характеристик (коэффициентов) важности каждой задачи, подлежащей решению, и результатов решения [2].

Первый этап — составление сценария, т. е. преимущественно качественного описания возможных вариантов развития ситуации на макроэкономическом уровне при различном сочетании определенных, заранее заданных условий. В зависимости от масштабности поставленных задач и предположительных сроков их реализации устанавливается временной горизонт развития ситуации. Но, учитывая сказанное о зависимости точности прогноза от временного горизонта прогнозирования, нет смысла давать картину развития ситуации на период более 5—10 лет.

Для разработки сценариев (прогнозов) необходимо привлекать специалистов высшей квалификации из сотрудников предприятия, заинтересованных министерств и ведомств и обязательно наиболее компетентных и эрудированных специалистов НИИ соответствующего профиля. Итогом разработки сценария является формулировка цели стратегии развития и функционирования системы промышленного производства (цели первого уровня).

Второй этап — построение детализированного до необходимого уровня дерева целей.

Третий этап — определение относительной важности всех мероприятий, заданий и задач, включенных в дерево целей с помощью коэффициентов значимости. Они представляют собой относительное выражение необходимости решения той или иной задачи, проведения того или иного мероприятия. Сумма коэффициентов должна равняться единице.

Коэффициенты значимости устанавливают эксперты из числа специалистов, руководствуясь собственной логикой и собственным пониманием сути объекта оценки. Авторами предложен новый подход к определению коэффициентов значимости, основанный на сочетании экспертных оценок и формализованных расчетных методов. Рассмотрим его на следующем примере.

В одной из НИР определялись коэффициенты значимости решения следующих пяти задач совершенствования системы промышленного производства ОАО "Красный пролетарий": привести конструктивные и эксплуатационные параметры металлорежущего станка КП-22М в соответствие с новыми условиями его эксплуатации; развить типаж металлорежущих станков; разработать и осуществить меры по демонополизации рынка металлорежущего оборудования; разработать и осуществить меры по привлечению негосударственных инвесторов в сферу промышленного производства; ввести квоты на поставки техники из дальнего зарубежья.

Вначале эксперты расположили эти задачи в порядке убывания их значимости, т. е. выстроили рейтинговый ряд — 4, 5, 1, 3, 2. Затем они определили, во сколько раз первая задача важнее последней (пятой). Полагаясь на свои знания, эксперты решили, что в настоящее время привлечь негосударственных инвесторов в сферу промышленного производства важнее, чем развить типаж станков как минимум в 10 раз. При этом отношение λ коэффициентов весомости a_5 и a_1 будет 1:10, т. е. 0,1.

После этого произвольно выбрали величину a_1, решив, что она равна 5. Коэффициент значимости последней задачи a_5 оказался равен 0,5 (5:10). При равномерном снижении значимость каждой следующей задачи уменьшается на величину $\Delta = (5 – 0{,}5):4 = 1{,}125$.

Таким образом, получили следующий ряд из $N = 5$ значений коэффициентов значимости: a_1 — 5; a_2 — 3,875 (5 – 1,125); a_4 — 2,75 (3,875 – 1,125); a_3 — 1,625 (2,75 – 1,125); a_5 — 0,5 (1,625 – 1,125).

Основываясь на этих соображениях, получена формула для расчета константы Δ — величины снижения каждого последующего коэффициента значимости по отношению к предыдущему:

$$\Delta = \frac{a(1-\lambda)}{N-1},$$

где a_1 — заданное экспертами первое в рейтинговом ряду задач значение коэффициента весомости (в нашем примере 5); λ — заданное экспертами отношение значений первого и последнего коэффициентов значимости в их рейтинговом ряду (в примере 0,1); N — число членов ряда (в примере 5).

Значение любого коэффициента значимости из рейтингового ряда $a_i = \Delta n_{i+1}$ (n_{i+1} — номер (i + 1)-го члена рейтингового ряда).

После преобразования получаем формулу для расчета i-го коэффициента значимости в окончательном виде:

$$a_i = a_1\left[1 - \frac{(n_i - 1)(1-\lambda)}{N-1}\right].$$

Если бы эксперты не пришли к консенсусу по поводу рейтинга задач и значений коэффициентов значимости, то решение определилось бы голосованием. Для получения сходимости процесса определения рейтинга задач и коэффициентов значимости может быть назначено два, три и более туров голосования в зависимости от числа экспертов. В каждом туре отбрасываются мнения, получившие наименьшее число голосов. Результаты подобной экспертизы служат основанием для определения объектов, очередности и объема инвестиций, оценки их эффективности и в конечном итоге разработки целевой программы и календарного плана реализации стратегии.

Предложенная методология способна обеспечить разработку стратегии и долгосрочных программ промышленного производства как единой системы организационно-управленческих, экономических, технологических, научно-методических и правовых мероприятий. Она также позволяет корректировать их в процессе реализации в зависимости от изменений макроэкономической ситуации, актуальности отдельных заданий, достигнутого уровня промышленного производства. Преимуществом данной методологии является также возможность использования коллективного опыта всех заинтересованных участников инвестиционного процесса, что позволяет избежать "волевых" оценок и связанных с ними ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мыльник В. В., Титаренко Б. П., Волочиенко В. А.* Исследование систем управления. Учебное пособие. М.: ЦИТОО, 2001. 383 с.
2. *Родинов В. Б., Федоров А. А.* Оценка коммерческой состоятельности инвестиционных проектов // Технология машиностроения. 2005. № 9. С. 69—71.

Т. В. СИЛЬЧЕНКО, канд. пед. наук
ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет"

Методы и алгоритмы контроля управления качеством образования в высших технических учебных заведениях

Качество образовательного процесса в высшем техническом учебном заведении должно быть таким, чтобы все подготовленные специалисты соответствовали предъявляемым требованиям. Но это не всегда возможно, во-первых, в силу объективных причин — недостаточного уровня образовательных технологий, низкого качества подготовки абитуриентов и т. д. Во-вторых, если даже и существует принципиальная возможность создания такого технологического процесса, практически это может быть нецелесообразно из экономических соображений. Технологический процесс образования специалистов, каждый из которых удовлетворял бы предъявленным требованиям, может оказаться настолько дорогим, что более предпочтительным будет процесс образования, допускающий возможность выпуска специалистов, не удовлетворяющих предъявленным требованиям, но с такой организацией контроля образования на определенных этапах, которая с допустимой степенью риска обеспечивала бы их трудоустройство.

Система контроля образования и его процессов в этом случае будет осуществлять как бы сортировку множества факторов на два класса: удовлетворяющих (соответствующих) предъявленным требованиям и приводящих к неудовлетворительным результатам. В таком понимании существо задачи контроля образовательных технологий, процессов и др. можно определить как задачу классификации объектов контроля, причем в общем случае число классов объектов контроля может быть больше двух. Каждый контролируемый объект может содержать несколько последовательно взаимосвязанных факторов, т. е. образовательных процессов или других действий.

Всегда среди множества решений относительно контролируемого объекта имеется только одно правильное. Очевидно, что в процессе контроля можно выбрать как правильное решение, так и неправильное. Следовательно, процедуру контроля нужно организовать таким образом, чтобы обеспечить выбор правильного решения. Но возможность выбора правильного решения зависит от той информации, которую используют при принятии решения. Поэтому самым существенным элементом контроля является получение качественной информации о свойствах контролируемого объекта, выражаемых значениями соответствующих параметров (физических величин). Однако оценить неизвестные значения параметров можно только измерением с помощью соответствующих методов или средств. Следовательно, измерение, как правило, является обязательной частью контроля, а выбор решения осуществляется на основе информации, содержащейся в результатах измерения, т. е. оценках отдельных факторов, составляющих все образовательное пространство.

Очевидно, что требования, предъявляемые к качеству специалиста, управлению образовательным процессом или другим действиям, следует выразить в форме некоторого интервала, в котором и должно находиться истинное значение их параметров качества, или, иначе говоря, в форме поля допуска (рис. 1). Такое поле допуска для параметра x однозначно задается следующими величинами (характеристиками): x_0 — номинальное значение; T_x — допуск; $E_c x$ — отклонение от номинального значения середины поля допуска.

Стандартное определение качества продукции по ГОСТ 15467—79: "Качество продукции есть совокупность свойств продукции, обусловливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением". Это определение является слишком общим и мало что дает для возможности реализации практической оценки качества каждого конкретного образца (экземпляра) продукции. В нашем случае под продукцией понимается соответствующий обучающийся или готовый специалист, или процесс, или действие, или услуга и т. д., определяемые исходя из структуры их жизненного цикла. В этом случае прежде всего неясно, что означает выражение "определенные потребности" и что значит "пригодность удовлетворять им". Попытаемся конкретизировать смысл этих понятий.

Выражение "определенные потребности" можно представить в форме поля допуска с параметрами x_0, T_x, $E_c x$, а "пригодность удовлетворять потребностям" будет означать, что истинное значение параметра x для оценки качества специалиста, образовательного процесса, действия и т. д. должно находиться в поле допуска. Все операции, которые будем выполнять применительно к оценке качества специалистов, управлению образовательными процессами, действием и др., будем называть факторами. Условимся поле допуска параметра качества x рассматриваемого фактора обозначать V_x'.

Контроль образовательных процессов или знаний можно производить различными методами.

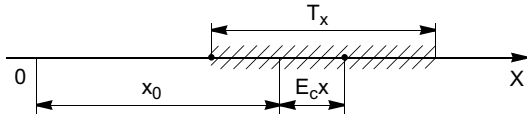


Рис. 1. Схема полей допусков

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 8

Пороговый контроль. Допустим, что речь идет о требуемых знаниях, которые должен иметь специалист. Очевидно, что при оценке знаний во время учебы каждый из обучающихся получает случайную оценку $\bar{Y} = Y + E$ (E — случайная погрешность измерения, т. е. оценки, равная $m_e + E_c$, где m_e — математическое ожидание погрешности измерения, E_c — центрированная случайная составляющая погрешности с дисперсией D_e). На основе исходных данных m_e, D_e и совокупности многократных действий $\bar{y} = (y_1, y_2, ..., y_n)^T$ алгоритм принятия решения при оценке качества должен выбрать решение $S = 1$ либо $S = 2$, т. е. специалист имеет требуемые качественные знания или нет, умеет или не умеет выполнять требуемую работу или что-то знает, что-то умеет, но не полностью.

Допусковый контроль. Для того чтобы обеспечить взаимозаменяемость специалистов, процессов, действий и др., производимых некоторой технологией образования, нужно, чтобы контролируемые факторы качественной величины x находились в поле допуска $\underline{x} \leqslant x \leqslant \bar{x}$ (x — наименьшее значение качественной величины, $\bar{x}$ — наибольшее значение этой качественной величины). Оценка качества специалистов, процессов и т. д. по их множеству является случайной величиной X с плотностью распределения $f(x)$ [1]. Для оценки значения размера качественной величины контролируемого фактора используем средства измерений со случайной погрешностью измерения E, характеризующейся плотностью распределения $f(e)$.

Цель контроля заключается в том, чтобы из исходной совокупности специалистов, процессов, т. е. рассматриваемых факторов, выделить совокупность взаимозаменяемых. В этой задаче контроля также имеются два класса факторов: первый образуют факторы, удовлетворяющие условию $\underline{x} \leqslant x \leqslant \bar{x}$, второй — факторы, удовлетворяющие условию $\underline{x} > x > \bar{x}$. Множество решений также равно $S = \{1, 2\}$. По контролируемому размеру каждого фактора производятся многократные измерения $\bar{y} = (y_1, y_2, ..., y_n)^T$. Алгоритм принятия решения на основе исходных данных между $\underline{x}$, $\bar{x}$, $f(x)$, $f(e)$ и результатами измерения $\bar{y}$ должен выбрать одно решение из множества $S = \{1, 2\}$.

Допусковый контроль с тремя классами подпроцессов. Предыдущую задачу контроля можно рассматривать как задачу классификации объектов контроля на приемлемые — первый класс, и неприемлемые — второй класс. Например, пусть контролируемым фактором является образовательный процесс по дисциплине "Детали машин" с курсовым проектом. Учитывая множество предыдущих образовательных процессов, т. е. черчения, теоретической механики и др., качество образовательного процесса по деталям машин будет случайной величиной D с плотностью распределения $f(d)$. Условие взаимозаменяемости отдельных разделов при изучении этих дисциплин выражается соотношением $\underline{d} \leqslant d \leqslant \bar{d}$ ($\underline{d}$, $\bar{d}$ — соответственно наименьшее и наибольшее значения оценок образовательных процессов предыдущих дисциплин). Но как оценить итоговое качество? Применяя допусковый контроль, получим совокупность взаимозаменяемых отдельных образовательных процессов по дисциплинам и совокупность замен или очередностей обучения. Попавшие в совокупность "дефектных", неравноценны в том смысле, что среди них есть такие, у которых $d > \bar{d}$, и такие, у которых $d < \bar{d}$. Очевидно, что образовательные процессы дисциплин с $d > \bar{d}$ путем дополнительного применения могут быть приведены к условию эквивалентности (это дисциплины с устранимым образовательным пробелом). Такие образовательные процессы дисциплин целесообразно выделить в самостоятельный класс образовательных процессов с устранимым действием или доучиванием. Таким образом, в данной постановке задачи контроля выделяются следующие три класса: первый — совокупность процессов, факторов, удовлетворяющих условию $\underline{d} \leqslant d < \bar{d}$, второй — условию $d > \bar{d}$, третий — условию $d < \underline{d}$. Соответствующее множество решений будет равно $S = \{1, 2, 3\}$, но алгоритм на основе исходных данных $\underline{d}$, $\bar{d}$, $f(d)$, $f(e)$ и результатов измерения $\bar{y}$ должен выбрать одно решение.

Выборочный контроль. Рассмотренные виды контроля предполагают, что контролируется каждый фактор образовательных процессов всего образовательного пространства (сплошной контроль). Однако такой сплошной контроль не всегда целесообразен и даже возможен. Его нецелесообразность может быть обусловлена, например, большими материальными затратами на проведение измерений в процессе контроля или недопустимо большой продолжительностью операции контроля, что ведет к большим затратам и в то же время постоянной напряженности в коллективах. Его невозможность имеет место в тех случаях, когда получение информации для принятия решения о контролируемом объекте связано с его разрушением или недопустимым изменением его свойств. Например, прекращается подготовка специалистов по одной специальности, а начинается по другой. В такой ситуации поступают следующим образом. Факторы (образовательные процессы и подпроцессы) необходимо разбить на этапы и каждый этап контролировать по альтернативному признаку. Например, этап высшего или первого уровня и, соответственно, категории их качества. Но и это существенно — исходная информация для принятия решения относительно всех этапов образовательного процесса берется не от всех факторов, а только от некоторой части, выбранной случайным образом (случайная выборка фактора). Информацией для принятия решения о факторе в целом служит число неприемлемых решений в выборке n. По множеству выборок это число будет случайной величиной N. Например, изучение некоторых дисциплин оценивается "зачет" или "не зачет". В этом случае вводится приемочное (допустимое) число λ и устанавливается следующее правило: если $n < \lambda$, то принимается решение о том, что этапы факторов следует считать относящимися к высшей категории качества. В этой задаче фигурируют два класса: первый образуют факторы, для которых $n \leqslant \lambda$, и второй — факторы, для которых $n > \lambda$, следовательно, из множества решений выбирается $S = \{1, 2\}$.

Формулировка задачи контроля управления образованием. Из предыдущих рассуждений следует, что контроль качества образования сводится к принятию по результатам измерений решения о принадлежности контролируемого фактора к одному из фиксированных множеств классов. Поэтому сначала следует определиться с тем, как можно описать класс математическими средствами,

т. е. с математической моделью класса. При формировании такой модели нужно учесть следующие особенности класса.

На значения каждого контролируемого параметра, характеризующего свойства данного класса, накладываются определенные ограничения так, что если $x \in V_x^{(k)}$, $k = \overline{1, m}$, то контролируемый фактор принадлежит k-му классу. Здесь $V_x^{(k)}$ — область допустимых значений (поле допуска) параметра x для фактора k-го класса ($\in$ — обозначение принадлежности значения x к области $V_x^{(k)}$).

Истинное значение параметра контролируемого фактора определяется образовательным процессом, который в силу наличия многих случайных количественных величин качества не может обеспечить одинаковое значение параметра для всех факторов. По множеству факторов значение контролируемого параметра нужно рассматривать как случайную величину X с плотностью распределения $f(x)$. Отсюда следует, что значение контролируемого, например образовательного процесса для фактора k-го класса, также является случайной величиной $X/X \in V_x^{(k)}$, где знаменатель $X \in V_x^{(k)}$ выражает условие принадлежности фактора k-му классу. Условная плотность распределения

$$f(x/X \in V_x^{(k)}) = f\left(\frac{x}{k}\right) = \begin{cases} \frac{1}{P_k} f(x) \text{ при } x \in V_x^{(k)} \\ 0 \text{ при } x \bar{\in} V_x^{(k)}, \ k = \overline{1, m}, \end{cases} \quad (1)$$

где P_k — вероятность проведения контроля фактора k-го класса (т. е. определенного образовательного процесса для такого-то курса, такой-то специальности или дисциплины), равная $P\{X \in V_x^{(k)}\} = \int\limits_{V_x^k} f(x)dx$.

Функции $f\left(\frac{x}{k}\right)$, $k = \overline{1, m}$ являются описаниями (математическими моделями) классов факторов в пространстве истинных значений параметра x.

Однако при контроле истинные значения параметра x контролируемых факторов неизвестны, а известны лишь результаты измерения параметра x, которые всегда включают случайную погрешность измерения, т. е. $Y = x + \bar{E}$ ($\bar{E}$ — центрированная случайная погрешность с дисперсией D_e, Y — случайный результат измерения).

Для конкретного контролируемого фактора x — const, и тогда получим

$$M[Y] = m_y = x, \ M[\bar{Y}^2] = D_y = D_e = \sigma_e^2 \ (\bar{Y} = Y - x = \bar{E}).$$

Полагая распределение случайной величины Y гауссовским, будем иметь следующее выражение для условной плотности распределения (x — const):

$$g(y/x) = \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(y-x)^2}{\sigma_e^2}\right\}.$$

По множеству факторов k-го класса значение параметра x является случайной величиной. Тогда случайный результат измерения запишется в виде $Y/X \in V_x^{(k)} = X/X \in V_x^{(k)} + \bar{E}$, $k = \overline{1, m}$, его условная плотность распределения $g(y/k) = \int g(y/x)f(x/k)dx$, $k = \overline{1, m}$. Функции $g(y/k)$, $k = \overline{1, m}$ являются описаниями классов факторов в пространстве значений результатов измерений.

Рассмотрим случай многократных измерений, т. е. многократных проверок образовательных процессов. Пусть $\bar{y} = (y_1, y_2, ..., y)^T$ — вектор-столбец n-кратных результатов измерений. По множеству выборок получим случайный вектор-столбец $\bar{Y}_n = (Y_1, ..., Y_n)^T$. Если контролируются процессы k-го класса, то будем иметь случайный вектор $\bar{Y}_n/X \in V_x^{(k)}$, которому соответствует условная плотность распределения

$$g(\bar{y}_n/k) = \int g(\bar{y}_n/x)f(x/k)dx, \ k = \overline{1, m}.$$

Функции $g(\bar{y}_n/k)$, $k = \overline{1, m}$ являются описаниями классов факторов в пространстве значений n-кратных результатов измерений.

Конкретизируем постановку задачи контроля: имея в качестве исходных данных P_k, $g(\bar{y}_n/k)$, $k = \overline{1, m}$ и результат измерения $\bar{y}_n$, нужно сформировать процедуру (правило, алгоритм) принятия решения о принадлежности контролируемого фактора к одному из фиксированных множеств классов. Этот алгоритм будет представлять некоторую функцию аргумента $\bar{y}_n$ со значениями из множества $S = \{s\}$, $s = \overline{1, m}$. Обозначим ее $s(\bar{y}_n)$. Какими особенностями должна обладать эта функция? Во-первых, она должна быть целочисленной со значениями из множества $S = \{s\}$, $s = \overline{1, m}$, во-вторых, должна быть однозначной, т. е. каждому результату измерения $\bar{y}_n$ должно соответствовать только одно решение.

Пусть $s(\bar{y}_n) = k$. Область значений вектора $\bar{y}_n$, в которой удовлетворяется это равенство, обозначим $V_y^{(k)}$, т. е. $V_y^{(k)} = \{\bar{y}_n \, s(\bar{y}_n) = k\}$, $k = \overline{1, m}$. Совокупности областей $V_y^{(k)}$, $k = \overline{1, m}$. Объединение (сумма) областей $V_y^{(k)}$, $k = \overline{1, m}$ образует область V_y, равную области возможных значений случайного вектора $\bar{Y}_n$, т. е. $\bigcup\limits_{k=1}^{m} V_y^{(k)} = V_y$.

Каждая пара областей $V_y^{(k)}$, $k = \overline{1, m}$ не содержит общих точек $\bar{y}_n$, т. е. является непересекающейся, и $V_y^{(k)} \cap V_y^{(l)} = \varnothing$ при $k = l$, $k, l = \overline{1, m}$ ($\cup$ — объединение областей, $\cap$ — произведение областей, $\varnothing$ — пустое множество).

Первое свойство является следствием того, что каждому значению вектора $\bar{y}_n \in V_y$ соответствует решение $s \in S$, а второе — следствие однозначности функции $s(\bar{y}_n)$.

С учетом изложенного можно отметить, что $s(\bar{y}_n) = l$ эквивалентно условию $\bar{y}_n \in V_y^{(l)}$, а это означает, что геометрическая интерпретация сущности алгоритма контро-

ля сводится к разбиению области возможных результатов измерений V_y на m непересекающихся областей $V_y^{(l)}$, $l = \overline{1, m}$ и присвоению им соответствующих решений $s \in S$. Такое разбиение возможно осуществить через построение разделяющих границ между областями. Возможно создание таких образовательных программ и технологий, чтобы между предметами были взаимосвязи и в то же время четкие границы.

Основные понятия и определения в теории контроля качества образовательных процессов. Рассмотрим простейший случай контроля, когда $m = 2$ (альтернативный вариант контроля). Пусть выбор решения осуществляется на основе n-кратных результатов измерений образовательных процессов, условные плотности распределения $g(\bar{y}_n/k)$, $k = 1, 2$ известны и области V_y^k, $k = 1, 2$ определены.

Пусть контролируемый фактор принадлежит классу $k = 1$. Тогда, если результат измерения $\bar{y}_n \in V_y^{(1)}$, то принимаемое решение $s(\bar{y}_n) = 1$. Это правильное решение. Если же $\bar{y}_n \in V_y^{(2)}$, то принимается решение $\bar{s}(y_n) = 2$. Это — *ошибочное решение* и называется оно ошибкой первого рода. Область $V_y^{(1)}$ называется допустимой, а область $V_y^{(2)}$ — критической для класса $k = 1$.

Вероятность ошибки первого рода называется уровнем значимости

$$P\{\bar{Y}_n \in V_y^{(2)}/k = 1\} = \alpha = \int g(\bar{y}_n/1)d\bar{y}_n. \qquad (2)$$

Предположим, что контролируемый фактор (процесс) принадлежит классу $k = 2$. Тогда, если $\bar{y}_n \in V_y^{(2)}$, то принимаемое решение $s(\bar{y}_n) = 2$ — правильное решение, а если $y_n \in V_y^{(1)}$, то $s(\bar{y}_n) = 1$ — ошибочное решение, называемое ошибкой второго рода. Вероятность этой ошибки

$$P\{\bar{Y}_n \in V_y^{(1)}/k = 2\} = \beta = \int\limits_{V_y^{(2)}} g(\bar{y}_n/2)d\bar{y}_n = 1 - \int\limits_{V_y^{(2)}} g(\bar{y}_n/2)dy_n. \qquad (3)$$

Отсюда следует, что вероятность

$$1 - \beta = \int\limits_{V_y^{(2)}} g(\bar{y}_n/2)d\bar{y}_n \qquad (4)$$

есть вероятность принять правильное решение относительно контролируемого образовательного процесса класса $k = 2$. Эту вероятность можно называть мощностью критерия выбора правильного решения по оценке качества контролируемого образовательного процесса.

Очевидно, что вероятности α и β характеризуют эффективность (качество) алгоритма контроля. Чем меньше эти вероятности, тем более эффективным является алгоритм контроля. Желательно, чтобы области $V_y^{(k)}$, $k = 1, 2$ были выбраны такими, для которых $\alpha, \beta = 0$, но при ограниченной кратности измерений такой эффективности добиться нельзя. Действительно, для того чтобы уровень значимости α сделать малым, нужно, как это следует из выражения (2), уменьшить область $V_y^{(2)}$. Но при этом возрастает область $V_y^{(1)}$ и, как видно из выражения (3), возрастает вероятность ошибки второго рода. Следовательно, решение задачи контроля образовательного процесса предпосылки в такой ситуации может быть найдено лишь на основе компромисса, сформулированного на некоторых разумных соображениях (критериях).

Алгоритм контроля максимального правдоподобия образовательного процесса для удовлетворения требуемого качества основан на рассмотрении соотношения условных плотностей распределения $u(\bar{y}_n) = \dfrac{g\bar{y}_n/1}{gy_n/2}$, которые можно назвать отношением правдоподобия. Алгоритм контроля имеет вид

$$s(\bar{y}_n) = \begin{cases} 1 \text{ при } u(\bar{y}_n) \geqslant 1, \\ 2 \text{ при } u(\bar{y}_n) < 1. \end{cases} \qquad (5)$$

Пусть $V_x^{(1)} = \{x: x = x_1 — \text{const}\}$, $V_x^{(2)} = \{x: x = x_2 — \text{const}\}$ и $x_2 > x_1$. Задача контроля заключается в том, чтобы по n-кратным измерениям принять решение о принадлежности контролируемого образовательного подпроцесса соответствующему классу.

Пусть однократные измерения имеют следующую структуру:

$$Y = \begin{cases} x_1 + \bar{E}, \text{ если контролируемый подпроцесс 1-го класса,} \\ x_2 + \bar{E}, \text{ если контролируемый подпроцесс 2-го класса,} \end{cases}$$

где $\bar{E}$ — центрированная случайная погрешность с дисперсией $D_e = \sigma_e^2$. Если случайная погрешность имеет гауссовское распределение, получим следующее выражение для условных плотностей распределения:

$$g(y/k) = \frac{1}{\sigma_e\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(y - x_k)^2}{\sigma_e^2}\right\}, \; k = 1, 2.$$

При условии некоррелированности n-кратных измерений соответствующие условные плотности распределения запишутся следующим образом:

$$g(\bar{y}_n/k) = \prod_{i=1}^{n} g(y_i/k) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \sigma_e^{-n} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_e^2}\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_k)^2\right\}, \quad k = 1, 2.$$

Определив отношение правдоподобия и логарифмируя его, имеем

$$\ln u(\bar{y}_n) = -\frac{1}{2\sigma_e^2}\left\{\sum_{i=1}^{n}[(y_i - x_1)^2 - (y_i - x_2)^2]\right\} = \frac{x_1 - x_2}{\sigma_e^2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \frac{x_1 + x_2}{2}\right).$$

При логарифмировании условие $u(\bar{y}_n) \geqslant 1$ перейдет в условие $\ln u(\bar{y}_n) \geqslant 0$. Поскольку в вышепреведенном выражении $\frac{x_1 - x_2}{\sigma_e^2} < 0$ и не зависит от результатов измерения, то $\ln U(\bar{y}_n) \geqslant 0$ будет иметь вид $\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \leqslant \frac{x_1 + x_2}{2}$.

Следовательно, алгоритм контроля

$$s(\bar{y}_n) = \begin{cases} 1 \text{ при } \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \leqslant \frac{x_1 + x_2}{2}, \\ 2 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Если решение нужно принять по однократному измерению, то

$$s(y) = \begin{cases} 1 \text{ при } y \leqslant \frac{x_1 + x_2}{2}, \\ 2 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Области принятия решений определяются выражениями

$$Y_y^{(1)} = \left\{ y: y \leqslant \frac{x_1 + x_2}{2} \right\}, \; Y_y^{(2)} = \left\{ y: y > \frac{x_1 + x_2}{2} \right\}.$$

Алгоритм контроля, основанный на потерях в образовательном процессе некоторых образовательных разделов.

Рассмотрим вариант компромисса, учитывающего образовательные, интеллектуальные и другие последствия процедуры контроля и принятия решений о принадлежности контролируемого образовательного процесса к определенному классу для случая двух классов. Эти последствия выразим в форме матрицы потерь:

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11}(n) & \Pi_{12}(n) \\ \Pi_{21}(n) & \Pi_{22}(n) \end{bmatrix} = [\Pi_{ks}(n)], \; k, s = 1, 2,$$

где $\Pi_{ks}(n)$ — потери, имеющие место в случае, если процесс k-го класса при контроле будет отнесен к s-му классу. Обычно эти потери представляются в виде

$$\Pi_{ks}(n) = C_{ks} + C_n,$$

где C — стоимость получения однократного измерения, n — число измерений, C_{ks} — потери за счет отнесения процесса k-го класса к s-му классу.

Пусть $k = 1$ — класс приемлемых образовательных процессов, $k = 2$ — неприемлемых. Тогда при $k = 1$ и $s = 1$ будет иметь место правильное решение и дополнительных потерь за счет принятия решения в этой ситуации не будет. Аналогично дело обстоит и при $k = 2$ и $s = 2$, поэтому потери для этих ситуаций обычно принимаются равными нулю, т. е. $C_{11} = C_{22} = 0$.

Рассмотрим ситуацию $k = 1$, $s = 2$. Здесь имеет место ошибочное решение, которое классифицирует приемлемый процесс как неприемлемый. В этой ситуации потери налицо ($C_{12} \neq 0$), от них страдает специалист и несет ответственность втуз. Он принял его на обучение, но из-за плохих образовательных процессов не подготовил нужным образом, следовательно $C_{12} > C_{11}$.

Перейдем к ситуации $k = 2$, $s = 1$. Здесь также имеет место ошибочное решение, но с другими по сравнению с разобранными выше последствиями. Здесь неприемлемый процесс классифицируется как приемлемый и потери несет не втуз, а потребитель. Он расплачивается за принятие неправильных решений специалистом, который на момент окончания втуза был не востребован (образовательный процесс неприемлемый).

В работе [2] установлено, что вероятность ошибочных решений $\alpha, \beta \neq 0$. При ограниченном числе измерений и уменьшении одной из этих вероятностей вторая возрастает. Это значит, что если вероятность ошибки первого рода сделать малой, то случаи отнесения приемлемых процессов к классу неприемлемых будут редкими и потери втуза, естественно, также малыми. Но при этом возрастет вероятность ошибки второго рода β, т. е. число случаев отнесения неприемлемых образовательных процессов к классу приемлемых возрастает, и, следовательно, возрастут потери потребителя. Итак, втузу нужно, чтобы процедура контроля обеспечивала малое значение вероятности α, а потребителю — малое значение вероятности β. Эти требования противоречивы и потому нужен компромисс.

Обозначим через P_k ($k = 1, 2$) вероятность появления на контроле образовательного процесса k-го класса. Эту вероятность можно называть априорной, так как она не зависит от результата обработки n-кратных измерений, которое обозначим $\bar{y}_n$. Наличие результата измерения $\bar{y}_n$ означает получение информации о контролируемом процессе, которая изменяет вероятность случайного события, состоящего в том, что контролируемый образовательный процесс принадлежит k-му классу. Эта вероятность становится условной относительно $\bar{y}_n$ и определяется известной формулой Байеса. Проведем следующее рассуждение. Пусть на основе результата n-кратных измерений $\bar{y}_n$ принято решение s. Тогда можно сформировать выражение

$$r(\bar{y}_n, s) = \Pi_{1s}(n)p(1/\bar{y}_n) + \Pi_{2s}(n)p(2/\bar{y}_n) = \sum_{k=1}^{2} \Pi_{ks}(n)p(k/\bar{y}_n), \quad (6)$$

определяющее средние потери при данном $\bar{y}_n$ и s.

Здравый смысл подсказывает, что нужно принять такое решение, при котором эти потери были бы минимальными, т. е.

$$s(\bar{y}_n) = \begin{cases} 1 \text{ при } r(\bar{y}_n, 1) \leqslant r(\bar{y}_n, 2), \\ 2 \text{ при } r(\bar{y}_n, 1) \leqslant r(\bar{y}_n, 2). \end{cases} \quad (7)$$

Используя формулу Байеса, получим

$$r(\bar{y}_n, 1) = \frac{1}{g(\bar{y}_n)} [\Pi_{11}(n)g(\bar{y}_n/1)p_1 + \Pi_{21}(n)g(\bar{y}_n/2)p_2],$$

$$r(\bar{y}_n, 2) = \frac{1}{g(\bar{y}_n)} [\Pi_{12}(n)g(\bar{y}_n/1)p_1 + \Pi_{22}(n)g(\bar{y}_n/2)p_2].$$

Неравенства, входящие в алгоритм контроля (7), можно записать в виде

$$[\Pi_{11}(n) - \Pi_{12}(n)]g(\bar{y}_n/1)p \leqslant [\Pi_{22}(n) - \Pi_{21}(n)]g(\bar{y}_n/2)p_2,$$

но поскольку $[\Pi_{11}(n) - \Pi_{12}(n)] < 0$ и $[\Pi_{22}(n) - \Pi_{21}(n)] < 0$, то предыдущее неравенство трансформируется:

$$[\Pi_{12}(n) - \Pi_{11}(n)]g(\bar{y}_n/1)p \geqslant [\Pi_{21}(n) - \Pi_{22}(n)]g(\bar{y}_n/2)p_2.$$

Данное неравенство можно выразить с использованием отношения правдоподобия:

$$\frac{g(\bar{y}_n/1)}{g(\bar{y}_n/2)} = u(\bar{y}_n) \geqslant \frac{\Pi_{21}(n) - \Pi_{22}(n)}{\Pi_{12}(n) - \Pi_{11}(n)} \frac{p_2}{p_1} = \lambda.$$

Теперь выражение (4) можно представить в следующей форме:

$$s(\bar{y}_n) = \begin{cases} 1 \text{ при } u(\bar{y}_n) \geqslant \lambda; \\ 2 \text{ при } u(\bar{y}_n) < \lambda. \end{cases} \qquad (8)$$

Сравнивая полученное ранее выражение алгоритма контроля с выражением (1), убедимся, что оба алгоритма построены на основе отношения правдоподобия. Если положить $\Pi_{11}(n) = \Pi_{12}(n) = 0$, $\Pi_{12}(n) = \Pi_{21}(n) = 1$, $P_1 = P_2$, то получим $\lambda = 1$. Это означает, что алгоритм контроля (1) является частным случаем алгоритма контроля (8).

Логарифмируя неравенство в (8) и используя соотношение (5), получим

$$\sum_{i=1}^{n} y_i - \frac{x_1 + x_2}{2} \leqslant \frac{\sigma_e^2}{x_2 - x_1} \ln\lambda = -\lambda^*, \text{ где } \lambda^* = \frac{\sigma_e^2}{x_2 - x_1} \ln\lambda.$$

В случае контроля образовательного процесса по однократным результатам измерений имеем $y \leqslant \frac{x_1 + x_2}{2} - \lambda^*$, и алгоритм контроля запишется следующим образом:

$$s(y) = \begin{cases} 1 \text{ при } y \leqslant \frac{x_1 + x_2}{2} - \lambda^*, \\ 2 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Разделяющая граница представляется точкой $\frac{x_1 + x_2}{2} - \lambda^*$ (рис. 2). Области принятия решений:

$$V_y^{(1)} = \left\{y: y \leqslant \frac{x_1 + x_2}{2} - \lambda^*\right\}, \; V_y^{(2)} = \left\{y: y > \frac{x_1 + x_2}{2} - \lambda^*\right\}.$$

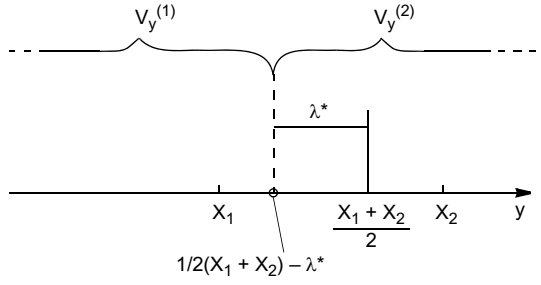


Рис. 2. Области решений

Алгоритм контроля Неймана-Пирсона для образовательного процесса. Суть этого критерия заключается в следующем: задается значение вероятности α качества обучения требуемых наиболее важных разделов и критическая область $V_y^{(2)}$ выбирается такой, чтобы вероятность $1 - \beta$ (мощность критерия) была максимальной [2, 3]. Используя метод множителей Лагранжа, можно показать, что в качестве критической следует взять такую область, которая максимизирует интеграл $\int_{V_y^{(2)}} [g(\bar{y}_n/2) - \lambda g(\bar{y}_n/1)]d\bar{y}_n$ (λ — неопределенный множитель Лагранжа). Максимум интеграла будет обеспечен в случае, если в область $V_y^{(2)}$ включить все точки $\bar{y}_n$, для которых подынтегральная функция будет неотрицательной, т. е. $u(\bar{y}_n) = \frac{g(\bar{y}_n/1)}{g(\bar{y}_n/2)} < \frac{1}{\lambda} = \hat{\lambda}$. Этому условию будет отвечать решение $s = 2$. Значение $\hat{\lambda}$ выбирается таким, чтобы обеспечить выполнение условия $\int_{-\infty}^{\hat{\lambda}} g(u/1)du = \alpha$ ($g(u/1)$ — условная плотность распределения отношения правдоподобия как случайной величины $U(Y_n/k = 1)$, обусловленной случайной величиной $\overline{Y}_n/k = 1$).

Таким образом, все рассмотренные критерии контроля приводят к одному алгоритму контроля:

$$s(\bar{y}_n) = \begin{cases} 1 \text{ при } u(\bar{y}_n) \geqslant \lambda \text{ — } const; \\ 2 \text{ в противном случае.} \end{cases} \qquad (9)$$

Специфика критериев проявляется лишь в значениях порога λ.

Алгоритм контроля процессов управления образованием для количества классов образовательных подпроцессов больше двух. Ранее отмечено, что в общем случае процесс контроля имеет дело с количеством классов контролируемых подпроцессов больше двух. Рассмотрим структуру этого алгоритма контроля для количества классов образовательных подпроцессов m.

Пусть $g(\bar{y}_n/k)$, $k = \overline{1, m}$ — условная плотность распределения результатов n-кратных измерений по подпроцессам k-го класса, $S = \{s\}$, $s = \overline{1, m}$ — множество номеров решений, $\Pi_{ks}(n)$, $k, s = \overline{1, m}$ — потери в случае, когда контролируемый процесс k-го класса относится к s-му классу, P_k, $k = \overline{1, m}$ — априорная вероятность выдачи решения на контроль образовательного процесса k-го класса.

Пусть известно $\bar{y}_n$ и принято решение s. Тогда средние априорные потери при контроле $r(\bar{y}_n, s) = \sum_{i=1}^{n} \Pi_{ks}(n)p(k/\bar{y}_n)$, где

$$p(k/\bar{y}_n) = \frac{g(\bar{y}_n/k)p_k}{\sum_{k=1}^{m} g(\bar{y}_n/k)p_k}. \qquad (10)$$

При фиксированном значении $\bar{y}_n$ выражение $r(\bar{y}_n, \bar{s})$ является функцией аргумента s, который принимает целочисленные значения $s = \overline{1, m}$. Решение s необходимо выбрать таким, при котором функция $r(y_n, s)$ имеет минимальное значение (при этом будут иметь место минимальные средние апостериорные потери):

$$\hat{s}(\bar{y}_n) = \operatorname{agr}\min_{s \in S} r(\bar{y}_n, s). \quad (11)$$

Алгоритм контроля (11) обозначим $\hat{R}_n$ и найдем выражение для показателя его эффективности. Введем обозначение

$$r(\bar{y}_n s)/s = \hat{s}(y_n) = r(\bar{y}_n, \hat{s}(\bar{y}_n)) = \rho^\circ(\bar{y}_n). \quad (12)$$

Тогда эффективность алгоритма контроля

$$w(\hat{R}_n) = \int_{V_y} \rho^\circ(\bar{y}_n) g(\bar{y}_n) d\bar{y}_n. \quad (13)$$

В силу определения (10) алгоритм контроля $\hat{R}_n$ удовлетворяет условию $w(\hat{R}_n) \leqslant w(R_n)$ для всех $R_n \in R_n^*$ (R_n^* — множество алгоритмов контроля для n-кратных измерений).

Алгоритм контроля (11) является оптимальным по критерию средних потерь. Рассмотрим частный случай потерь, когда

$$\Pi_{ks}(n) = \begin{cases} 0 \text{ при } s = k_1; \\ 1 \text{ при } s \neq k. \end{cases}, \quad (14)$$

Обозначим $p_{ks}(n) = \int_{V_y^{(s)}} g(\bar{y}_n / k) d\bar{y}_n$, $k, s = \overline{1, m}$ — вероятность принять решение о принадлежности образовательного процесса k-го класса к s-му классу по результату обработки n-кратных измерений. Тогда с учетом допущения (14)

$$w(\hat{R}_n) = \sum_{k, s = 1}^{m} \Pi_{ks}(n) p_{kS}(n) p_k = \sum_{k, s \neq 1}^{m} p_{kS}(n) p_k. \quad (15)$$

Очевидно, что вероятности $p_{ks}(n)$, k, $s = \overline{1, m}$, $s \neq k$ есть вероятности ошибочных решений при контроле процесса k-го класса, тогда выражение (15) представляет среднюю вероятность ошибочных решений при контроле. Следовательно, алгоритм контроля $\hat{R}_n$ в этом случае обеспечит минимум средней вероятности ошибочных решений.

Для случая двух классов образовательных процессов ($m = 2$) показано, что $P_{12}(n) = \alpha(n)$, $P_{21}(n) = \beta(n)$, $\lim_{n \to \infty} \alpha(n) = 0$, $\lim_{n \to \infty} \beta(n) = 0$, т. е. для того, чтобы обеспечить вероятности ошибочных решений малыми числами, нужно провести большое число измерений ($n \gg 1$). Этот вывод является верным и для случая $m > 2$, но, во-первых, с увеличением количества измерений n растут элементы матрицы потерь $[\Pi_{kS}(n)]$, k, $s = \overline{1, m}$. Во-вторых, при большом n процедура контроля затягивается во времени. Поэтому существует некоторое число $n = N$, которым рационально ограничить количество многократных измерений при контроле образовательного процесса. Из каких соображений можно оценить значение N?

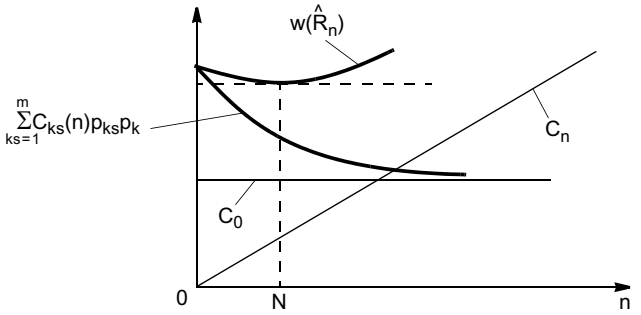


Рис. 3. Графики слагаемых функций

Рассмотрим выражение (15) с учетом элементов матрицы потерь:

$$w(\hat{R}_n) = \sum_{k, s = 1}^{m} (C_{ks} + C_n) p_{ks}(n) p_k = \sum_{k, s = 1}^{m} C_{ks} p_{ks}(n) p_k + C_n. \quad (16)$$

Поскольку вероятности $P_{ks}(n)$, k, $s = \overline{1, m}$ удовлетворяют условию

$$\lim_{n \to \infty} p_{ks}(n) = \begin{cases} 1 \text{ при } s = k; \\ 0 \text{ при } s \neq k, \end{cases}$$

будем иметь

$$\lim \sum_{k, s = 1}^{m} C_{ks} p_{ks}(n) = \sum_{k = 1}^{m} C_{kk} p_k = C_0. \quad (17)$$

Графики слагаемых функций (16) и график самой этой функции от n приведены на рис. 3.

Из характера изменения функции $w(\hat{R}_n)$ видно, что существует некоторое значение N, при котором значение этой функции минимально, т. е.

$$N = \operatorname{agr}\min_n w(\hat{R}_n).$$

Это значение N и следует принять за оптимальное значение числа измерений при принятии решений о контроле образовательных процессов.

Алгоритм контроля качества управления образовательным процессом для допускового контроля при недостатке образовательных подпроцессов. Рассмотрим задачу построения алгоритма контроля для случая допускового контроля с тремя классами: область значений отклонения параметра от номинального значения для процесса первого класса $V_x^{(1)} = \{x: x \leqslant x \leqslant \bar{x}\}$, второго класса — $V_x^{(2)} = \{x: x < \underline{x}\}$, третьего — $V_x^{(3)} = \{x: x > \bar{x}\}$ ($\underline{x}$, $\bar{x}$ — соответственно нижнее и верхнее предельные отклонения контролируемого параметра).

X — отклонение контролируемого параметра по множеству образовательных процессов — случайная с гауссовской плотностью распределения с числовыми харак-

теристиками $M[X] = 0$, $M[\bar{X}^2] = D_x = \sigma_x^2$ — *const* и плотностью распределения

$$f(x) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sigma_x^{1} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma_x^2}\right\}. \quad (18)$$

Таким образом, множество классов образовательных процессов равно $K = \{k\}$, $k = 1, 2, 3$. Множество решений совпадает с множеством классов подпроцессов, т. е. $S = \{s\}$, $s = 1, 2, 3$.

При контроле качества управления образовательными процессами имеем независимую от X погрешность измерения с гауссовской плотностью распределения с числовыми характеристиками $M[E] = 0$, $M[\bar{E}^2] = D_e = \sigma_e^2$ — const.

Результат измерения при фиксированном x имеет структуру $Y = x + \bar{E}$ и потому обладает гауссовской плотностью распределения с числовыми характеристиками $M[Y/x] = x$, $M[\bar{Y}^2/x] = D_e = \sigma_e^2$, т. е.

$$g(y/x) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sigma_e^{-1} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(y-x)^2}{\sigma_e^2}\right\}. \quad (19)$$

Случайные результаты измерения по множеству контролируемых процессов имеют структуру $Y = X + E$ и являются гауссовскими с плотностью распределения $g(y)$ с числовыми характеристиками $M[Y] = M[X] + M[E] = 0$.

$M[\bar{Y}^2] = M[\bar{X}^2] + M[\bar{E}^2] = D_x + D_e = D_y = \sigma_y^2$, т. е.

$$g(y) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sigma_y^{-1} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right\}. \quad (20)$$

Элементы матрицы потерь примем равными

$$C_{ks} = \begin{cases} 0 \text{ при } s = k, \\ 1 \text{ при } s \neq k. \end{cases} \quad (21)$$

Будем рассматривать случай, когда решение о принадлежности контролируемого подпроцесса к классу принимается по однократному измерению. Используя выражения (10) и (21), получим

$$r(y, s) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq s}}^{3} p(k/y), \quad (22)$$

где апостериорные вероятности $p(k/y)$ определяются на основе условной плотности распределения $f(x/y)$ и для каждого $k = \overline{1,3}$ равны соответственно: $p(1/y) = \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} f(x/y)dx$, $p(2/y) = \int_{-\infty}^{\bar{x}} f(x/y)dx$, $p(3/y) = \int_{\bar{x}}^{\infty} f(x/y)dx$.

Найдем условную плотность распределения $f(x/y)$, для чего воспользуемся известным соотношением $g(y, x) = g(y/x)f(x) = f(x/y)g(y)$, откуда следует $f(x/y) = \frac{1}{g(y)} g(y/x)f(x)$.

Подставив правую часть этого выражения в соотношения (18) и (19), получим $f(x/y) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sigma^{-1} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(x-\bar{\gamma}_y)^2}{\sigma^2}\right\}$,

$$\text{где } \sigma = \frac{\sigma_x\sigma_e}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_e^2}} = \sigma_e \frac{1}{\sqrt{1+\eta^2}}; \ \gamma = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_x^2 - \sigma_e^2} = \frac{1}{1+\eta^2}; \ \eta = \frac{\sigma_e}{\sigma_x}. \quad (23)$$

Проанализируем произведение подынтегральных функций

$$g(y/x)f(x) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_e} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{y^2 - 2yx + (1+\eta^2)x^2}{\sigma_e^2}\right\}.$$

При $\eta \ll 1$

$$p_{ks} = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} \int_{V_y^{(k)}} dy \int_{V_y^{(s)}} g(y/x)dy.$$

Из этого выражения следует, что для определения вероятностей ошибочных решений нужно определить значение интеграла

$$\int_{x_1}^{x_2} F\left[\Phi\left(\frac{\hat{s} - x}{\sigma_e}\right)\right] dx, \quad (24)$$

где x_1, x_2 — пределы интегрирования по x; $\hat{s} \in \{\bar{y}, \underline{y}\}$ — граничные точки областей принятия решений в пространстве результатов измерений образовательных процессов; Φ — функция Лапласа.

Вычисление интеграла (24) без использования современного программного обеспечения и вычислительных средств является трудной операцией. Эти процедуры реализуются просто в виде стандартной программы с четырьмя входами: $\underline{x}$, $\bar{x}$, σ_x, σ_e.

Показатель эффективности алгоритма контроля — средняя вероятность ошибочных решений — определяется на основе выражения (16) при числе классов подпроцессов $m = 3$. Возможно и бóльшее количество подпроцессов, но тогда необходимо сгруппировать их в глобальные образовательные процессы с количеством подпроцессов не более 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сильченко Т. В.* Разработка документации системы менеджмента качества для отдельной организации // Перспективные технологии оценки и мониторинга качества в образовании 2003. С. 76—79.
2. *Сильченко Т. В.* Обоснования к построению и разработке методов и алгоритмов контроля управления качеством образования в высших технических учебных заведениях // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2007. № 1.
3. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Физматгиз, 1974. 832 с.
4. *Сильченко Т. В.* Совершенствование системы менеджмента качества на основе внутренних аудитов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. Вып. 3 (10). 2006. С. 107—709.

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Содержание зарубежных журналов[1]

American Machinist
(N 1, Vol. 150, 2006, США)

Прецизионный координатно-шлифовальный станок с ЧПУ, с. 13, ил. 2.

Фирма Moore Tool Company (США) разработала станок, при эксплуатационных испытаниях обеспечивающий получение допусков по круглости порядка 0,25 мкм и точность линейного позиционирования 1,25 мкм. Обрабатывали втулки из стали (в том числе коррозионно-стойкой) и твердых сплавов, которые используют в формах, миниатюрных электронных аппаратах и медицинских приборах. Использовали алмазные круги на полимерной связке при частоте вращения 40 000 мин$^{-1}$ и СОЖ на водной основе.

Станки для снятия заусенцев, с. 18.

Станки серии CF-Oil фирмы Otec Precision Finish Inc. (США) предназначены для снятия заусенцев и микрозаусенцев после чистового шлифования и хонингования. При этом используют центробежные силы и масло в качестве рабочей среды, поэтому нет необходимости в обезжиривании деталей перед обработкой и сушке после обработки. Осуществляется автоматическое отделение обработанных деталей от технологического масла.

Комплект для абразивно-струйной резки, с. 27, ил. 2.

Фирма WardJet Inc. (США) поставляет комплекты серии M для выполнения абразивно-струйной резки на различных серийных станках: фрезерных, токарных и др. В состав устанавливаемого на столе комплекта входят ванна на шарикоподшипниках, оградительный тент, режущая головка, устройство подачи абразива и насос-мультипликатор давления. Создается рабочая зона размером 0,6 × 1,2 м. Поставляются ванны глубиной 90, 127 и 203 мм и насос на давление 140 МПа (в стандартном исполнении). Стандартные насосы позволяют резать алюминиевый лист толщиной 51 мм, а стальной лист — толщиной 19 мм. По заказу поставляются насосы на давление 280 и 420 МПа, обеспечивающие резку материалов толщиной до 254 мм.

Каталог по металлорежущим станкам с ЧПУ, с. 53, ил. 1.

Фирма Southwestern Industries (США) выпустила каталог, в котором приведены характеристики выпускаемых станков для точения и фрезерования в мелкосерийном производстве, оснащенных системами ЧПУ типа CNC, а также рекомендации по использованию CNC-технологии для обработки небольших партий деталей.

(N 2, Vol. 150, 2006, США)

Инструментальные патроны, с. 16, ил. 1.

Фирма Techniks предлагает новую серию инструментальных патронов CoolFlex для закрепления хвостовиков концевых инструментов. Патроны позволяют оператору переключать направление потока СОЖ, подаваемой через полость шпинделя металлорежущего станка, с помощью двух резьбовых заглушек. Они предназначены для установки в шпинделях CAT40 и CAT50, имеют цанги размером от ER16 до ER40 и балансируются при частоте вращения 18 000 мин$^{-1}$.

Зажимные устройства по системе "нулевой точки", с. 24, ил. 1.

Фирма Kurt Manufacturing предлагает зажимные устройства VB DockLock для закрепления обрабатываемых деталей по системе "нулевой точки". Зажимное устройство состоит из небольшого числа элементов, просто в эксплуатации и легко защищено от стружки и СОЖ. Устройство позволяет устанавливать и закреплять тиски с помощью гидравлического цилиндра с рабочим усилием 11,2 кН. Точность позиционирования составляет ±0,005 мм.

(N 4, Vol. 150, 2006, США)

Система голосового предупреждения о неисправности, с. 14, ил. 1.

Фирма VLH Controls Inc. (США) поставляет систему беспроводного голосового контроля в производственных цехах. С помощью речевой команды осуществляется быстрый останов машины. Микрофоны с шумоподавлением и алгоритмы программного обеспечения позволяют использовать систему в шумных помещениях (при уровне шума от 75 до 93 дБ). Система принимает команды более чем на 12 языках.

Система ЧПУ для мелкосерийного производства, с. 33, ил. 1.

Фирма Southwestern Industries (США) поставляет систему ЧПУ типа CNC ProloTRAK для токарных и фрезерных станков, эффективную в условиях мелкосерийного производства. Она позволяет контролировать процессы обработки и обеспечивает получение качественной продукции. Возможно также переключение на ручное управление с помощью средств TRAKing^{TM} при отработке управляющей программы.

Продукция корпорации Universal/DoVlieg Microbore LLC (США), с. 91, 92, ил. 1.

Новая корпорация, в которую вошли компании Universal Engineering, Microbore и Microset, выпускает крепежную оснастку, оснастку для расточных станков и приборы размерной настройки инструментов, а также шпиндели Kmik-Switch и оправки к ним, цанговые патроны Acu-

[1] Раздел подготовлен инж. Г. С. Потаповой (по вопросам получения материалов обращаться по тел./факсу: (495) 611 21 37, e-mail: stankoinform@mail.ru).

ra-Flex, Acura-Grip, Acura-Mill и Acura-Tap, инструменты для чернового и чистового растачивания.

(N 5, Vol. 150, 2006, США)

Проволочно-вырезной электроэрозионный станок, с. 38 ил. 1.

На выставке WESTECH — 2006 в США фирма Charmilles экспонировала станок Robofil 240cc/440cc, эффективный при обработке инструментальной стали, титана и его сплавов, а также инструментов из поликристаллических алмазов. Максимальные амплитуды повышены с 440 до 1200 А по сравнению с предшествующей моделью, а максимальное напряжение поджигания разряда увеличено на 25 %. Заготовка может поворачиваться относительно оси *B* при осуществлении электроэрозии вдоль осей *X* и *Y*. Таким образом, возможно изготовление сложнопрофильных деталей. CC-генератор предотвращает окисление титана при обработке медицинских изделий.

Станки для водоструйной обработки, имеющие ЧПУ, с. 40, ил. 1.

На выставке WESTTECH — 2006 в США компания MC Machinery Sysytems Inc. экспонировала три модели станков с насосами мощностью 45 кВт, оснащенных системами Mitsubishi CNC, в том числе двухкоординатный Classica, четырехкоординатный Dynamica (с поворотной режущей головкой) и пятикоординатный Evolution. Высокопроизводительные станки оснащены одной или двумя режущими головками и столами из коррозионно-стойкой стали, что облегчает обслуживание и позволяет поддерживать зону обработки чистой.

Модернизация металлорежущих станков, с. 57, ил. 1.

Описан опыт фирмы CNC Engineering (США) по выполнению разнообразных работ по модернизации станков. Фирма оснащает станки открытыми системами ЧПУ корпорации GE Fanuc и поворотными столами, измерительными головками, лазерными приборами для размерной настройки инструментов и системами мониторинга инструментов.

(N 2, 2007, США)

Bates Ch. Автоматизация вспомогательных операций при обработке резанием, с. 32—34, ил. 3.

За счет автоматизации смены режущих инструментов и поддонов с обрабатываемыми деталями эффективность использования горизонтального многоцелевого станка можно увеличить на 50—80 %. Однако для повышения эффективности оборудования на 90 % и выше, особенно при частой смене объектов обработки и при мелкосерийном производстве, необходима дальнейшая автоматизации, а именно, создание систем с мультиподдонами. Так, например, система с восемью поддонами может обеспечить обработку восьми или более деталей или выполнение такого же числа различных операций при обработке одной детали. Приведены примеры роботизированных систем со стеллажами поддонов фирм Makino и Automated Concepts (система LM-8D для работы с деталями диаметром 63,5—114,3 мм) для обслуживания многоцелевых станков с обработкой по пяти осям.

Haftl L. Автоматизированные рабочие участки, с. 36—37, 57, ил. 1.

Описываются три рабочих участка фирмы Peer, работающие 24 ч в сутки, семь дней в неделю, обслуживаемые всего девятью операторами и выпускающие от 750 000 до 1 млн деталей в год с допусками на размеры от 10 до 15 мкм. Каждый участок занимает площадь 9,1 × 3,1 м и состоит из двух обрабатывающих и одного сборочного постов. Обрабатывающий участок включает вертикальный многоцелевой станок фирмы Mori Seiki, робот фирмы Fanuc, систему обдува сжатым воздухом, круг для удаления заусенцев и два небольших ленточных транспортера для связи со сборочным постом и прессом для запрессовки втулок, устройство для выдачи втулок и трансферный робот Fanuc.

Bens J. Охлаждающая жидкость, с. 42, 44—46, ил. 1.

Контроль за состоянием СОЖ и продление срока ее службы снижают стоимость обработки и ликвидации отработанной СОЖ. Рассмотрены основные факторы эффективного использования СОЖ, включающие наряду с оптимальным выбором и постоянным контролем состояния СОЖ своевременную и качественную очистку СОЖ. Приведены основные преимущества и недостатки наиболее часто применяемых типов СОЖ, в числе которых чистые режущие масла, масляные суспензии, синтетические и полусинтетические СОЖ.

Werkslatt und Betrieb
(N 3, Vol. 139, 2006, Германия)

Sporer A. Контроль процесса шлифования, с. 35—37, ил. 4.

Представлены основные особенности управления процессом шлифования с применением акустическо-эмиссионных систем (DE-датчиков), когда AE-сигнал передается не через шлифовальный круг, фланец, шпиндель и подшипник, а воспринимается измерительной системой (M-датчик), установленной непосредственно на вращающемся валу шпинделя, что сопровождается меньшими помехами. Приведено описание процесса контроля за шлифованием при дистанционном обслуживании, для чего разработано электронно-программное обеспечение. Дано его краткое описание и связь с Ethernet 07.

Современные шлифовальные станки, с. 38, ил. 1.

Сообщается о международной выставке шлифовальных станков GrindTec2006, проходившей в Аугсбурге (Германия) 15—18 марта. В выставке приняли участие свыше 280 фирм из 20 стран, что на 20 % больше, чем два года назад. Одну треть участников выставки составляли иностранные фирмы, причем наибольшее число иностранных фирм было из Швейцарии (37) и Италии (19). В выставке принимали участие и фирмы из России. К новациям в области шлифовальных станков относятся станки для двустороннего шлифования параллельных плоскостей и многошпиндельные круглошлифовальные станки.

Обработка зубчатых колес, с. 43, ил. 1.

Жесткие требования относительно компактности, больших вращающих моментов, надежности и бесшумности работы современных зубчатых передач могут быть выполнены только за счет современного технологического процесса обработки зубчатых колес, включающего предварительную механическую обработку заготовок,

термическую и окончательную обработку. Приведены примеры технологии обработки.

Ozdyk K. Новое в технологии изготовлении конических зубчатых колес, с. 44, 46—48, ил. 6.

Описываются новации в области изготовления конических зубчатых колес со спиральными зубьями. Речь, в частности, идет о способе "Closed Loop". Эта технология включает применение ПО, автоматически корректирующее параметры для устранения погрешностей непосредственно в процессе обработки, зуборезной головки с резцами "Twin-Blade", обеспечивающей одновременную обработку выпуклой и вогнутой боковых поверхностей детали, и управление беззазорным линейным приводом по всем осям вращения.

Türirh A. Правка круга при зубошлифовании, с 54—57, ил. 6.

Описываются проблемы правки шлифовального круга при шлифовании зубьев зубчатых колес. Проведен сравнительный анализ эффективности различных способов правки круга и указывается на преимущества правки профильного шлифовального круга с помощью устройства для правки с армированным алмазами специальным зубчатым колесом по сравнению с классическим способом правки с помощью ролика. В качестве примера рассматривается работа зубошлифовального станка Gleason 245TWG.

Lönch K. Шлифование зубьев зубчатых колес, с. 65, 66, ил. 4.

Фирма Kapp предлагает технологию шлифования зубьев зубчатых колес с модулем 3,6—4,5 мм и шириной зубьев 40 и 60 мм, включающую использование зубошлифовальных станков KX 300 P и профильных шлифовальных инструментов в виде цилиндрического червяка из КНБ, получаемых гальваническим способом, которые не требуют правки в процессе работы. Время шлифования колеса с 15 зубьями и припуском на обработку по боковой поверхности 0,12 мм составляет менее 50 с.

Шлифовально-полировальный станок для доработки ободов из алюминия, с. 86, ил. 1.

Описывается станок фирмы Walther Trowal GmbH & Co KG для мелкосерийного производства, отличающийся компактностью, отсутствием необходимости в фундаменте и возможностью подключения к обычным сетям энергоснабжения.

Каталог сверл, с. 87.

Фирма Kempf предлагает каталог твердосплавных и быстрорежущих сверл VHM-HSC. Каталог содержит подробное описание на немецком и английском языках конструкции и области применения сверл и разверток — от спиральных микросверл до центрирующих. Кроме того, приведены сведения о сортах твердых сплавов.

(N 4, Vol. 139, 2006, Германия)

Scharpf P. D. Уменьшение вспомогательного времени, с. 26, 27.

Технический уровень современных станков настолько высок, что дальнейшее повышение их производительности возможно только за счет снижения вспомогательного времени, т. е. времени от снятия со станка готовой детали до установки новой заготовки. Фирма Boehringer Werkzejgmaschinen GmbH реализовала эту возможность (вспомогательное время снизилось с 9,6 до 5,34 с) в вертикальном двухшпиндельном токарном станке NV252 за счет манипулирования с заготовками и деталями параллельно с основным временем обработки.

Trametal
(N 95 (ноябрь), 2005, Франция)

Точение высокопрочных материалов, с. 11, ил. 1.

Технология точения высокопрочных материалов приобретает все более широкое распространение, поскольку позволяет заменить чистовую обработку, обычно производимую шлифованием. Рассмотрена сущность финишной обработки, ее недостатки, обусловленные оставлением рисок на поверхности детали, что ограничивает в настоящее время применение финишного точения, которое может эффективно осуществляться только тогда, когда к поверхности детали не предъявляют особо высокие требования. Для решения этой проблемы, связанной с появлением дефектов, зависящих от подачи, фирмой Sumitomo создана система инструментов "без рисок", которые, по данным фирмы, при любых подачах гарантируют высокое качество поверхности деталей без каких-либо дефектов. Приведено подробное описание процесса точения с использованием данной системы, сведения об инструментах, режущих пластинах из КНБ. Отмечена высокая экономичность технологии.

(N 96 (декабрь), 2005, Франция)

Режущие инструменты из композиционного материала, с. 16, ил. 1.

Фирма Stellram разработала инструмент, состоящий из двух сортов твердого сплава, и режущую пластину из биматериала. Такое конструктивное решение позволяет использовать оптимизированный твердый сплав в критических участках инструмента для повышения эффективности процесса резания и стойкости инструмента. Первыми из таких инструментов, созданных фирмой и подвергнутых испытаниям, были сверла, которые позволили осуществлять обработку с высокими скоростями резания на всей глубине отверстия при достижении высокого качества обработанной поверхности. Такие инструменты гарантируют втрое более высокую производительность. В начале 2006 г. эти инструменты начали применять для обработки различных сталей.

Широкоуниверсальные многоцелевые станки, с. 18, ил. 2.

Фирма Emag, специализирующаяся на производстве многоцелевых станков, разработала оригинальную концепцию их совершенствования, создав компактный "модулярный" станок, в котором обрабатываемая деталь, закрепленная на ориентируемом установочном устройстве, перемещаемом по трем осям, может быть последовательно подведена к одному из множества инструментальных шпинделей, встроенных в станину — раму станка, что исключает необходимость в системе смены инструментов. Приведен пример одного станка новой концепции.

Высокоскоростной станок для обработки сложных деталей, с. 44. ил. 1.

Фирма YCM разработала пятикоординатный станок, специально предназначенный для прецизионной высокоскоростной обработки сложных деталей, например,

электродов, компонентов электронных или медицинских устройств. Станок имеет наклоняемый поворотный стол Lehman диаметром 70 мм, на котором можно устанавливать детали массой до 75 кг. Шпиндель мощностью 10,4 кВт с конусом HSKA40 вращается с частотой до 23 600 мин$^{-1}$. Магазин рассчитан на 20 инструментов.

Прецизионный токарный станок для обработки простых деталей, с. 46, 48.

Фирма Tornos, специализирующаяся на производстве токарных станков, разработала станок для изготовления простых, но прецизионных деталей при обеспечении оптимальной экономичности. Согласно проведенным испытаниям, стоимость их изготовления снижается на 30 % по сравнению с обработкой на других станках. В станке применены компоненты на основе MultiDECO, позволяющие выполнять наиболее сложные операции с обеспечением высокой производительности и точности. На станке можно достичь производительности до 40 деталей в 1 мин. Согласно проведенным испытаниям, детали диаметром 8 мм можно изготовлять с высокой точностью без необходимости ее коррекции, при этом расхождение в размерах по диаметру не превышало 0,006 мм. Такой станок представляет особый интерес для автомобильной промышленности.

(N 101 (июнь), 2006, Франция)

Исследования в области технологии черновой обработки, с. 6, 8, 10, ил. 5.

Проанализированы возможности обработки, в частности крупных деталей, и факторы, от которых зависит эффективность такой обработки, — экономичность, производительность, стойкость применяемых фрез. Среди основных влияющих факторов — мощность оборудования, геометрия резания фрезы и параметры режимов резании. Показана возможность высокопроизводительной обработки и на станках с ограниченной мощностью при правильно выбранной технологии черновой обработки. Приведены результаты исследований.

Modern Machine Shop
(N 9 (февраль), Vol. 78, 2006, США)

Проблемы технологии электроэрозионной пришивки глубоких отверстий, с. 56.

В производстве часто возникает необходимость прошивки глубоких отверстий малого диаметра в материалах высокой твердости. Такие отверстия могут быть исходными для последующей вырезки на электроэрозионном станке, когда используется микропроволока. При этом необходимо получение отверстий без заусенцев. Отверстия малых диаметров обычно изготовляют на специальных электроэрозионных станках, которые имеют конструктивные отличия от серийных станков. Такую технологию применяют, например, при изготовлении миниатюрных форм, компонентов штампов, лопаток турбин, вакуумных плит, миниатюрных медицинских и электронных деталей.

Технология электроэрозионной обработки, с. 62.

При использовании технологии присадок в диэлектрическую жидкость, разработанную фирмой Charmilles, крошечные графитовые частицы взвешиваются в жидкости. Равномерному распределению частиц способствует наличие дополнительных проточных каналов в резервуаре с диэлектриком и настольной ванне электроэрозионного станка. Не требуется отдельной системы фильтрации, которая необходима для других аддитивных технологий. Разработанная технология Gammatec реализуется на серийных копировально-прошивочных электроэрозионных станках. Фильтрация графитовых добавок и очистка диэлектрической жидкости занимают, по данным фирмы, порядка 20 мин.

Повышение эффективности станков за счет активного контроля, с 118—120, 122—124, ил. 2.

Рассмотрены меры, предпринятые в механическом цехе авиационной компании Lockheed Martin Aeronautics по сокращению брака продукции. Отмечается оснащение фрезерных станков контрольно-измерительными щупами, управляемыми от программы Metroiosys фирмы Shadow Automation Inc., что позволило перейти на активный мониторинг процесса обработки и уменьшить на 25 % потери времени, затрачиваемого на размерный контроль с помощью контрольно-измерительной машины.

Эксплуатация токарных станков с ЧПУ по безлюдной технологии стала прибыльной для новой фирмы, с 126—128, 129, ил. 1.

Описан опыт фирмы PZ Engineering, созданной в 2003 г., внедрения двух токарных станков 220M с ЧПУ типа CNC с наклонной станиной и одного пятикоординатного фрезерно-токарного центра T6MS фирмы Colchester. Отмечается оснащение станков прутковыми питателями, что позволило эксплуатировать их в безлюдном режиме в ночное время при производстве клапанов сериями до 18 000 шт. с высокой эффективностью.

Зажимной патрон из полимербетона, с. 146, ил. 1.

Фирма Hainbuch Welge предлагает зажимной патрон To Plus для закрепления деталей. Патрон имеет шестигранную вставку из полимербетона, что уменьшает массу и центробежные силы при вращении по сравнению со стальными патронами. Пирамидальная форма зажимного элемента обеспечивает равномерное усилие зажима по всем поверхностям и отсутствие зазоров. Кроме того, такая конструкция обеспечивает увеличение усилия зажима на 25 %.

Повышение эффективности обработки на токарном станке, с. 157.

Сообщается об устройстве PoliStar фирмы TPS International, предназначенном для применения на токарных станках с ЧПУ типа CNC с приводной револьверной головкой для обработки шпоночных канавок и пазов на внутреннем диаметре. Возвратно-поступательное движение устройства PoliStar подобно операции протягивания позволяет пользователю обтачивать деталь без необходимости вторых операций.

ИНФОРМАЦИЯ

2-я Международная специализированная выставка "ВакуумтехЭкспо–2007"

С 14 по 16 марта 2007 г. в Москве в КВЦ "Сокольники" состоялась 2-я Международная специализированная выставка вакуумной техники, материалов и технологий. Свою продукцию на выставке демонстрировали более 80 ведущих компаний из России, Германии, Японии и других стран. Цель выставки — показать перспективные направления развития вакуумной техники и технологии, а также помочь компаниям, использующим вакуумную технику и вакуумные технологии, решить ряд задач, стоящих перед ними.

Ниже приведено краткое описание некоторых экспонатов, демонстрировавшихся на выставке, и предложений предприятий-разработчиков, вызвавших наибольший интерес у специалистов.

ООО "Московский завод вакуумных электропечей" (Реутов Московской обл.) предложило потребителям вакуумные электропечи и запасные части к ним. Технологии нагрева и термической обработки в вакууме резко снижают уровень загрязнения окружающей среды, обеспечивают экологически чистое производство, способствуют развитию безотходных производств. Приведем краткое описание некоторых предложений.

Электропечь сопротивления камерная вакуумная СНВЭ-2.4.2/16И12 для проведения различных термических процессов (отжига, дегазации, спекания) и исследований в вакууме при 1600 °С. Электропечь состоит из нагревательной камеры, вакуумного блока и щита управления, может работать в среде нейтральных газов повышенной чистоты при избыточном давлении не более 0,02 МПа. Термические процессы осуществляются в автоматическом режиме системой автоматического управления, выполненной на базе микропроцессора. Электропечь предназначена для работы в условиях умеренного климата при 5—35 °С, относительной влажности воздуха не выше 80 %, во взрывобезопасной среде, не содержащей агрессивных газов и паров, не насыщенной водяными парами и токопроводящей пылью. Установленная мощность электропечи 35 кВт. Стабильность поддержания номинальной температуры при управлении нагревом системой автоматического регулирования ±5 °С. Питающее напряжение нагревателя и органов управления 380 В. Масса электропечи 2 т.

Электропечь сопротивления двухколпаковая вакуумная СГВ-2.4.2/15 И3 (рис. 1) для проведения различных термических процессов и исследований в вакууме при 1500 °С. Допускается работа в среде нейтральных газов повышенной чистоты при избыточном давлении не более 0,02 МПа. Термические процессы осуществляются в автоматическом режиме микропроцессором "Протерм". Электропечь работает при 5—35 °С и относительной влажности до 80 % во взрывобезопасной среде, не содержащей агрессивных газов и паров, не насыщенной водяными парами и токопроводящей пылью. Мощность электропечи 25 кВт, стабильность поддержания температуры при управлении нагревом системой автоматического регулирования ±5 °С. Размер рабочего пространства: диаметр 200 мм, высота 400 мм. Питающее напряжение 380 или 220 В. Масса электропечи 2 т.

НПП электронного специального технологического оборудования (Зеленоград Московской обл.) предложило автоматическую установку "Каролина" Д12Б2 для магнетронного напыления. Установка осуществляет магнетронное напыление на керамические, кремниевые и любые другие плоские (толщина не более 30 мм) подложки диаметром до 100 мм и плоские детали размером 100 × 350 мм. На установке также осуществляются очистка поверхности изделий перед напылением с целью улучшения адгезии напыляемых слоев с помощью ионного источника постоянного тока; нагрев изделий до заданной температуры, контроль и поддержание температуры в процессе напыления; стабилизация заданного расхода технологических газов и контроль расхода газа; контроль и автоматическое окончание напыления резистивных и металлических пленок по заданному времени. Вакуумная камера установки снабжена специальной дверью для удобства загрузки-выгрузки носителей. Для обслуживания камеры дверь поднимается над плитой гидроподъемником. Мощность блока питания ионного источника 4 кВт, рабочий ток магнетронов — регулируемый — 0,5—18 А, рабочее напряжение 300—650 В. Допустимое давление в камере при работе магнетронов 0,07—0,30 Па. Работает установка при температуре 15—30 °С и относительной влажности 65 %.

Рис. 1. Электропечь сопротивления двухколпаковая вакуумная СГВ-2.4.2/15 И3

ООО "МЭШплюс" (Зеленоград Московской обл.) разрабатывает и изготовляет новое технологическое вакуумное оборудование для нанесения покрытий магнетронным, дуговым и электронно-лучевым способами. Приведем краткое описание некоторых образцов данного оборудования.

Модернизированная вакуумная электрическая печь сопротивления мод. СНВЭ-1.3.1/16 для проведения различных термических процессов и исследований в вакууме при температуре до 1600 °С. Допускается работа в нейтральных газах при избыточном давлении не более 0,02 МПа. В конструкции печи предусмотрена возможность подключения системы управления в общую информационную сеть с интерфейсом PS-485 для регистрации на ПК текущих температурных и вакуумных режимов в печи. Это позволяет одновременно с помощью

ПК контролировать, архивировать и распечатывать данные с более чем 128 печей (вместо применения большого числа электромеханических потенциометров типа КСП). Благодаря внедрению современной элементной базы в оборудовании электропечи достигнуты следующие преимущества по сравнению с аналогами: полная автоматизация процесса вакуумной откачки с диагностикой работоспособности вакуумного оборудования; автоматический нагрев печи по заданной температурной диаграмме с диагностикой работоспособности термопар в процессе работы. В случае отказа термопары происходит автоматический переход к резервной термопаре. Мощность установки 20 кВт, стабильность поддержания температуры ±2 °С, питающее напряжение 380/220 В. Расход воды на охлаждение 0,8 м^3/ч.

Высоковакуумная установка МЭШ-31 для нанесения покрытий методом магнетронного распыления в сочетании с ионной обработкой. Установка состоит из высоковакуумного агрегата с вынесенными насосами и стойки питания и управления. В рабочей камере агрегата расположена карусель с вертикальной осью вращения. Изделия фиксируются на легко снимаемых носителях. После получения в рабочей камере высокого вакуума изделия проходят очистку в высокоэнергетической плазме ионного источника, после чего магнетроном на изделия могут быть напылены покрытия из двух металлов, нитридов и (или) оксидов металлов. Размер носителей для обрабатываемых изделий 700 × 180 мм, число носителей на карусели 12 шт. Управление технологическим процессом — полуавтоматическое. Питающее напряжение установки 380 В, потребляемая мощность 45 кВт, габаритные размеры 2500 × 4000 × 2300 мм.

Ионно-плазменная установка ННВ-6,6 для нанесения упрочняющих однослойных и многослойных покрытий на инструмент широкой номенклатуры диаметром до 200 мм и длиной до 250 мм способом конденсации вещества ионной бомбардировкой. Установку применяют для напыления различных металлов и пластмассы. Скорость осаждения покрытия (нитрида титана) 13—40 мкм/ч. Длительность цикла упрочнения инструмента 2,0—2,5 ч. Размеры рабочей камеры: диаметр 600 мм, высота 600 мм. Число токопроводящих электродов 3 шт. Расход охлаждающей воды не более 2 м^3/ч. Масса установки 3 т.

Рис. 2. Машина "Комета-М-К" для термической резки и фигурного раскроя листового металлопроката

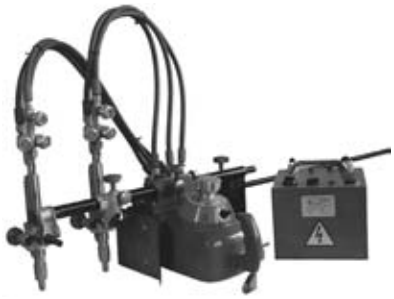


Рис. 3. Переносная газорежущая машина "Радуга М"

ОАО "ЗОНТ" (Одесса) демонстрировало машины для газокислородной и плазменной резки.

Машину "Комета М-К" (рис. 2) для термической резки и фигурного раскроя листового металлопроката с газокислородной оснасткой, портального типа с системой ЧПУ CNC 4000 и газокислородной технологической режущей оснасткой. Ширина обрабатываемого листа до 8000 мм, длина до 24 000 мм. Наибольшая толщина разрезаемого листа при газокислородной резке одним резаком до 300 мм, двумя — до 100 мм, тремя — до 80 мм. Наименьшая толщина обрабатываемого листа 3 мм. Размер колеи направляющих рельсового пути до 9500 мм. Толщина пробивки до 160 мм. Точность позиционирования ±0,35 мм. Питающее напряжение машины 380 В, потребляемая мощность не более 2 кВт.

Малогабаритную машину "Метеор" портального типа для микроплазменной резки листовой низкоуглеродистой стали и ее сплавов, а также цветных металлов шириной 1500 мм и длиной 3000 мм. Толщина обрабатываемого листа 0,8—40,0 мм, толщина пробивки до 20 мм. Машина оснащена системой ЧПУ CNC 4000, работающей в трех координатах. Скорость отработки контура 50—16 000 мм/мин. Питающее напряжение машины 380 В, габаритные размеры 3200 × 1630 × × 1650 мм, масса ходовой части 275 кг.

Машину "АСШ-70М" для фигурной вырезки деталей из низкоуглеродистой стали толщиной 5—150 мм тремя резаками с автоматическим копированием по стальному шаблону толщиной 6—8 мм. Диапазон скоростей машины позволяет применять ее и для плазменной резки листов толщиной 1—50 мм одним плазменным резаком (скорость перемещения резака 100—2000 мм/мин, точность позиционирования машины при черчении ±0,5 мм, габаритные размеры 1810 × 1500 × 1750 мм, масса 390 кг.

Переносную газорежущую машину "Радуга-М" (рис. 3) для газокислородной резки листовой низкоуглеродистой стали одним или двумя резаками одновременно, кройки листов на полосы, вырезки фланцев прямоугольных деталей, а также деталей произвольной формы. Машина обладает возможностью производить резку листов с разделкой кромок под сварку. Максимальный расход на один резак кислорода — 20 м^3/ч, горючего газа — 1,8 м^3/ч. Максимальная ширина полосы при резке двумя резаками 330 м, диаметр вырезаемых кругов 300—3000 мм, толщина разрезаемого листа 5—200 мм. Питающее напряжение машины 24 В, потребляемая мощность 0,09 кВт, габаритные размеры машины 420 × 670 × 440 мм, масса 18 кг.

Систему числового программного управления CNC 4000 для управления процессом раскроя металла на исполнительной машине для термической резки портального типа с прямоугольной системой координат, газокислородной, плазменной или комбинированной режущей оснасткой. Система обеспечивает перемещение рабочих органов по требуемой траектории в соответствии с картой раскроя, реализацию требуемых алгоритмов управления технологической оснасткой в процессе выполнения раскроя, создание и редактирование программ, обмен программами с внешней ЭВМ, диагностику и настройку электрооборудования машины выполняют на базе промышленного одноплатного компьютера с процессором Pentium.

Фирма Sidrabe (Рига) предложила потребителям вакуумные установки различного назначения.

Установку P600MR (рис. 4) для нанесения вакуумных покрытий на полимерные рулонные материалы в производстве сенсорных и жидкокристаллических экранов, гибких печатных плат и т. п. Уникальная многобарабанная конструкция отличает эту машину от машин подобного назначения других производителей. Установка обеспечивает нанесение слоев SiO_2, TiO_2, ITO и различных металлических слоев при одностороннем магнетронном распылении. Оборудована устройством перемотки, узлом магнетронного распыления, приборами контроля параметров наносимых слоев. Предусмотрена возможность нагрева и охлаждения процессорных барабанов. Прямоугольная вакуумная камера установки изготовлена из коррозионно-стойкой стали с полированными внутренними стенками. Она разделена на шесть отсеков: размотки пленки с устройством тлеющего разряда; намотки; промежуточный отсек и три отсека для нанесения покрытий. Устройство перемотки выполнено реверсивным. На центральном процессорном барабане постоянная скорость поддерживается частотным управлением. Устройство перемотки с приводом откатывается от камеры на одной тележке, в то время как магнетроны откатываются в противоположную сторону на другой тележке. Система управления на основе PLC фирмы Siemens обеспечивает автоматическое управление всем технологическим процессом. Параметры покрытия контролируются после каждой зоны осаждения, что гарантирует точное соблюдение параметров процесса для каждого наносимого слоя. Скорость перемотки 0,5—5,0 м/мин, максимальный диаметр рулона пленки 600 мм, габаритные размеры установки 14 500 × 10 000 × 3700 мм. Основными преимуществами установки являются уменьшение взаимного влияния газовой среды различных зон осаждения благодаря давлению в промежуточном отсеке в 5—10 раз ниже, чем в зонах нанесения покрытий; контроль характеристик покрытия после каждой зоны нанесения, что обеспечивает высокоточное управление параметрами покрытия; эффективный отвод теплоты от пленки к барабанам, осуществляемый за счет большого радиуса охвата барабана пленкой.

Рис. 4. Вакуумная установка P600MP

Вакуумную установку G600MN для нанесения защитно-декоративных покрытий на объемные изделия из пластмасс, стекла и загрунтованных лаком металлов. Установка оснащена устройствами ионно-плазменной подготовки поверхности изделий и нанесения покрытий методом магнетронного распыления. Изделия, закрепленные на кассетах, проходят все технологические зоны, при этом загрузка и выгрузка кассет осуществляются с одной стороны. Непрерывный технологический цикл длится примерно 120 ч с цикличностью выхода кассет 15 с. Максимальные размеры обрабатываемого изделия: диаметр 210 мм, высота 145 мм. Мощность установки 150 кВт, габаритные размеры 11 750 × 7500 × 2350 мм, масса 15 т. Сочетание линейного перемещения кассет с вращением изделий в зоне ионно-плазменной обработки и распыления, а также расположение магнетронов под регулируемым углом обеспечивают равномерное и качественное нанесение покрытий.

Компания "МИЛЛАБ" (Москва) демонстрировала вакуумное оборудование, разработанное в США. Приведем краткое описание некоторых образцов.

Двухступенчатый мембранный насос MZ2C с высокой скоростью откачки (1,9 $м^3$/ч) при низком предельном вакууме. Все части насоса, контактирующие с газом или паром, изготовлены из химически стойких фторсодержащих пластиков. Конструктивно он имеет два цилиндра, мощность его двигателя 0,18 кВт, габаритные размеры насоса 267 × 241 × × 177 мм, масса 10,6 кг. Насос применяют во многих химических насосных вакуумных системах.

Трехступенчатую низковакуумную установку PC620 (рис. 5), одновременно контролирующую два независимых процесса при разных уровнях вакуума с помощью двух вакуумных портов и двух вакуум-регуляторов CVC2. Установка имеет встроенные обратные клапаны для защиты от загрязнения. Химический мембранный

Рис. 5. Трехступенчатая низковакуумная установка PC620

насос МДИС, входящий в состав установки, обладает большим запасом избыточной мощности, что позволяет работать с вакуумом, равно удовлетворяющим требованиям обоих технологических процессов. Установка оснащена изолированным конденсатором пара, удаляющим пары, конденсирующиеся при атмосферном давлении и температуре охлаждающей воды. Габаритные размеры установки 440 × 380 × 535 мм, масса 29 кг.

ООО "ULVAC" (Москва) предложило потребителям оборудование, разработанное в Японии на базе новых вакуумных технологий.

Линию вакуумного напыления серии EVL для нанесения отражательного покрытия, а также других видов покрытий на автомобильные фары методом сухого напыления. В состав линии могут входить однокамерные напылительные установки с двумя дверцами, в которых возможно одновременное проведение технологических процессов до четырех видов.

Установку серии VEP-1000 для изготовления нанопленок и пленок толщиной до 100 микрон, позволяющую наносить изоляционные, защитные и металлизированные пленки, а также пленки других видов. Для нанесения пленок используют технологию вакуумного осаждения с последующей полимеризацией.

В рамках выставки прошли научные семинары и конференции, на которых специалисты ознакомились с новинками в области вакуумной техники и технологий в условиях делового общения.

А. Н. Иванов, инж.

Календарь выставок на IV квартал 2007 г.

Москва*			
Изделия и технологии двойного назначения. Диверсификация ОПК *Специализированная выставка с международным участием*	02.10—05.10	ОАО «ГАО “ВВЦ”» (пав.70) РВК "Эксподизайн"	129223, Москва, пр-т Мира, тел.: (499) 760 3004 Тел.: (495) 783 0622
Атомная энергетика и электротехника. Энергетическое машиностроение	09.10—11.10	ЦМТ	123610, Москва, Краснопресненская наб., 12, тел.: (495) 258 8117, факс: (495) 253 9187
Российская неделя измерительного оборудования *Международная специализированная выставка*	16.10—18.10	ЦВК "Экспоцентр"	123100, Москва, Краснопресненская наб., 14, тел.: (495) 255 3723, факс: (495) 205 6935
Робототехника *Специализированная выставка*	16.10—19.10	ОАО «ГАО "ВВЦ"» (пав.70)	«
ЭлектроТехноЭкспо *Международная специализированная выставка электротехнического оборудования и новых технологий в электроэнергетике*	23.10—26.10	МВЦ "Крокус Экспо"	143400, Московская обл., Красногорск, 66-й км МКАД
MIIF *Московская международная промышленная ярмарка*	23.10—26.10	ОАО «ГАО "ВВЦ"» (пав.70) ОВК "Бизон"	— Тел.: (495) 937 4081
Индустрия пластмасс – 2007 *Международная специализированная выставка*	26.10—29.10	ЦВК "Экспоцентр"	—
Экоэффективность *Международная выставка энергосберегающих и экологически чистых технологий*	30.10—01.11	ЦВК "Экспоцентр" ООО "ИнтерЭкодиалог"	— Тел.: (495) 744 1771
INTERTOOL Все многообразие инструмента *Международная специализированная выставка*	30.10—02.11	ЦВК "Экспоцентр" ЗАО "Евроэкспо", M.S.I.	— Тел.: (495) 105 6561
РОССВАРКА/ WELDEX *Международная специализированная выставка*	30.10—02.11	КВЦ "Сокольники", MVK	107113, Москва, Сокольнический вал, 1, тел./факс: (495) 995 0595
WASMA *Международная выставка-форум по управлению отходами*	30.10—02.11	«	«
Металл-экспо *Международная специализированная выставка*	13.11—16.11	ОАО «ГАО "ВВЦ"» (пав.20, 57) ЗАО "Металл-экспо"	— 129085, Москва, ул. Б. Марьинская, 9, стр. 1, тел./факс: (495) 901 9966
Технологии промышленной окраски *Международная специализированная выставка*	13.11—16.11	КВЦ "Сокольники", MVK	—
Безопасность и охрана труда *Международная выставка*	04.12—07.12	ОАО «ГАО "ВВЦ"»	—
Санкт-Петербург**			
Российский промышленник *Промышленный форум-выставка: металлообработка, машиностроение, станки и инструменты, приборостроение*	02.10—05.10	ВК "Ленэкспо" ВО "Рестэк"	199106, С.-Петербург, Васильевский о-в, Б. проспект, 103, тел.: (812) 321 2819 197110, С.-Петербург, ул. Петрозаводская, 12, тел.: (812) 320 6363
Мехатроника и робототехника *1-я международная выставка-конгресс*	02.10—05.10	ВК "Ленэкспо"	—
HI-TECH Высокие технологии. Инновации. Инвестиции *Международная специализированная выставка*	октябрь	ВК "Ленэкспо", ВО "Рестэк"	—
Промэлектро *1-я специализированная выставка промышленной электротехники и электроники*	09.10—11.10	ИВЦ Северо-Запада РФ ВО "СИВЕЛ"	196143, С.-Петербург, пл. Победы, 2, тел.: (812) 373 5278 Тел.: (812) 324 6416
Наука. Техника. Интеллект *Межрегиональная специализированная выставка*	09.10—11.10	ИВЦ "Евразия" ВО "СИВЕЛ"	194100, С.-Петербург, ул. Капитана Воронина,13 —
Наука на службе производства Ленинградской области *Специализированная выставка*	27.11—29.11	—	—
Регионы России**			
Металлургия. Город. Человек *Межрегиональный металлургический форум, объединяющий специализированные выставки: "Металлургия", "Сварка", "Автоматизация", "Росмаш"*	02.10—05.10	ЗАО "Кузбасская ярмарка"	654005, Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 18, тел.: (3843) 468 260, факс: (3843) 468 446
Экология Сибири *Специализированная выставка в рамках Сибирского энергетического форума*	02.10—05.10	«	«
Машиностроение. Металлообработка *Всероссийская специализированная выставка*	09.10—11.10	ООО "ВЦ Волгоградэкспо"	400005, Волгоград, пр-т Ленина, 98, тел.: (8422) 242 031
Металлообработка. Сварка. Машиностроение. Экология *Межрегиональная специализированная выставка*	09.10—11.10	ВЦ "Восточные ворота"	454080, Челябинск, ул. Энтузиастов, тел./факс: (3512) 263 7512
Промышленный салон *Международная специализированная выставка-форум*	09.10—12.10	ВЦ "Экспо-Волга"	443110, Самара, ул. Мичурина, 23А, тел./факс: (8462) 703 406
Машиностроение: станки, инструменты. Металлообработка *Межрегиональная специализированная выставка*	16.10—19.10	ВЦ "Башэкспо"	450080, Уфа, ул. Менделеева, 146/2, тел.: (3472) 908 719, факс: (3472) 908 707

Продолжение

Сварка. Контроль. Реновация *Международный сварочный форум-выставка*	16.10—19.10	«	«
Приборостроение. Электроника. Электротехника *Межрегиональная специализированная выставка*	23.10—25.10	ВЦ «КОСК "Россия"»	Екатеринбург
Безопасность и охрана труда. Средства индивидуальной защиты *Межрегиональная специализированная выставка*	23.10—26.10	ЗАО "Универсальные выставки"	620054, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 13, тел./факс: (343) 355 0042
Машиностроение. Металлургия. Металлообработка *Специализированная выставка*	23.10—26.10	Ижевский экспоцентр	426063, Ижевск, ул. К.Маркса, 244, тел./факс: (3412) 51 1315
Высокие технологии. Инновации *Выставка-конференция*	24.10—26.10	ВЦ "ЮжУралэкспо"	454007, Челябинск, ул. Артиллерийская, 132, тел.: (351) 247 1770
Инновации. Производство. Рынок *Выставка инновационных проектов*	24.10—26.10	Ярославский ЦНТИ	150003, Ярославль, пр-т Ленина, 2А, тел.: (4852) 303 981
Энергосбережение *Межрегиональная специализированная конференция-выставка*	07.11—08.11	Вятская ТПП, ВЦ "Вятка-экспо"	610004, Киров, ул.Сурикова, 19, тел.: (8332) 635 380
Экотек *Международная выставка-ярмарка*	13.11—16.11	КВК "Экспо-Сибирь"	650099, Кемерово, пр-т Советский, 63, тел./факс: (3842) 366 883
Энергетика и энергосбережение *Международная выставка-ярмарка*	13.11—16.11	«	«
Омскполитех *Сибирская комплексная промышленная выставка*	13.11—16.11	МВЦ "Интерсиб"	644033, Омск, ул Красный путь, 155, к.1, тел./факс: (3812) 252 520
Машиностроение. Металлообработка *Специализированная выставка*	13.11—16.11	ОАО "Тюменская ярмарка"	625013, Тюмень, ул. Севастопольская, 12, тел./факс: (3452) 485 353
Инвестиции. Инновации. Высокие технологии *Межрегиональная выставка-ярмарка*	14.11—15.11	Пензенский ЦНТИ	440047, Пенза, ул.Ульяновская, 1, тел.: (8412) 464 970, факс: (8412) 455 631
Электротехника. Энерго- и ресурсосбережение *Специализированная выставка*	20.11—23.11	ВК "Красноярская ярмарка"	660049, Красноярск, а/я 252261, тел.: (3912) 363 287, факс: (3912) 363 329
Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций	21.11—23.11	ВЦ "СофитЭкспо"	410004, Саратов, ул. Чернышевского, 60/62, тел.: (8452) 205 470
Инновации *Межрегиональная выставка инновационных проектов и новых технологий*	30.11—01.12	ВЦ "Аркада"	173002, Великий Новгород, ул. Германа, 1А, тел.: (8162) 732 046
Сварка *Специализированная выставка-конференция*	04.12—06.12	ВО "Уральские выставки-2000"	620007, Екатеринбург, ул. Свердлова, 11а, тел./факс: (343) 355 5195
Контроль и диагностика *Специализированная выставка*	04.12—06.12	«	«
Технофорум *Промышленно-техническая выставка машиностроения, станкостроения и приборостроения*	11.12—13.12	ВВЦ "Регион"	400007, Волгоград, а/я 3400, тел./факс: (8442) 242 602
Машиностроение. Металлообработка *Международная специализированная выставка*	12.12—14.12	ВЦ "Казанская ярмарка"	420059, Казань, Оренбургский тракт, 8, тел./факс: (843) 270 5111
Technосварка *Специализированная выставка*	12.12—14.12	«	«
Машиностроение. *Выставка продукции отраслей машиностроения, оборудования и инструмента*	12.12—14.12	Агентство "Максимум-Информ"	170000, Тверь, ул.Советская, 60, оф. 43, тел./факс: (4822) 345 207
Промэкспо *Специализированная промышленная выставка*	12.12—14.12	«	«
Латвия			
TECH INDUSTRY *Международная выставка материалов, техники и технологий промышленного производства*	15.11—17.11	ВТ1	LV-1048, ул.Кипсалас, 8, Рига, тел.: (10 371) 706 5000
Безопасность на производстве *Специализированная выставка*	15.11—17.11	«	«
Молдавия***			
МОЛДЭКО *Международная специализированная выставка технологий и оборудования для охраны окружающей среды*	24.10—28.10	МВЦ "MOLDEXPO"	Кишинев, ул. Гиочеилор, 1, тел.: (10 373 22) 747 419
Украина			
Электротех *Международная специализированная выставка*	24.10—27.10	Международный выставочный центр ТПП Украины	Киев, Броварской пр-т, 15 Киев, ул. Б.Житомирская, 33, тел.: (10 380 44) 272 2805
Стандарты и качество *Специализированная выставка-форум оборудования и приборов для контроля и управления качеством*	07.11—09.11	ТПП Украины	—
Австралия***			
ELECTRIX *Международная выставка электротехнической промышленности*	15.10—17.10	AES- Australian Exhibition Services Pty Ltd	Сидней, тел.: +613/926 14500 факс: +613/926 14545

Продолжение

The Safety Show Sydney *Международная специализированная выставка промышленной безопасности и охраны труда*	24.10—26.10	AEC- Australian Exhibition&Conferences Pty Ltd	Сидней, тел.: +613/96547773, факс: +613/96545596
Бахрейн***			
Metal Middle East *Специализированная выставка металлообрабатывающего оборудования*	ноябрь	Bahrain Convention& Exhibition Bureau	Манама, тел.: +97317/558810, факс: +97317/555513
Болгария***			
RE USE *Специализированная выставка-ярмарка восстановленного оборудования*	октябрь	International Fair Plovdiv	Пловдив, тел.: +35932/902 000, факс: +35932/902 432
Бразилия***			
METALTECH *Выставка технологий и оборудования для металлообрабатывающей промышленности*	02.10—04.10	Grupe CIPA Ltd	Сан-Паулу, тел.: +_55 011/577 4355, факс: +55 011/577 4239
Вьетнам***			
Vietnam International Machine Tool & Automation Industry Show – Linkage *Международная специализированная выставка металлорежущего оборудования*	октябрь	Paper Communication Exhibition Servises.	Гонконг, тел.: +85202/7639011, факс: +85202/3410379
Германия***			
SURFACTS *Специализированная выставка поверхностной обработки изделий из металла*	09.10—11.10	КМК	Карлсруэ, тел.: +490721/37200, факс: +490721/37202149
MATERIALICA *Международная специализированная выставка и конгресс по технологиям обработки поверхностей, конструкторским разработкам*	22.10—26.10	Messe Munchen GmbH	Мюнхен, тел.: +49089/9492 0720, факс: +49089/9492 1419
IENA *Международная выставка инновационных технологий*	01.11—04.11	AFAG Messen und Ausstellungen GmbH	Нюрнберг, тел.: +49 1805/860 7000, факс: +49 1805/860 700 500
SPS/IPC/DRIVES *Международная выставка-конференция по системам автоматизации*	27.11—29.11	Messe Frankfurt GmbH	Нюрнберг, тел.: +49 069/757 56803, факс: +49 069/757 56788
Индонезия***			
Machine Tool Indonesia *Международная выставка оборудования, технологий металлообработки и смежных отраслей промышленности*	05.12—08.12	PT Pamerindo Buana Abadi	Джакарта, тел.: +62021/316 2001, факс: +62021/316 1981
MANUFACTURING Indonesia SERIES *Международная выставка производственного оборудования, материалов и сервисных услуг*	05.12—08.12	«	«
AUTOMATION TECHNOLOGY INDONESIA *Международная выставка технологий управления и автоматизации производства*	05.12—08.12	«	«
Италия***			
Polveri Cleantech *Выставка технологий нанесения порошковых покрытий и промышленного очистного оборудования и технологий*	октябрь	La Rivista del Colore Srl	Верона, тел.: +39 039/629 041, факс: +39 039/629 042
BIMEC *Специализированная выставка промышленной автоматизации, механики и контрольно-измерительного оборудования*	октябрь	UCIMU-SISTEMI-PER PRODURRE Spa	Милан, тел.: +3902/262551, факс: +3902/26255349
Канада***			
CMTS *Специализированная выставка металлорежущего инструмента*	15.10—18.10	Reed Exhibitions	Торонто, тел.: +1416/491 7565, факс: +1416/491 5088
Китай***			
GEAR CHINA *Международная выставка производственных технологий и передаточных механизмов*	октябрь	Business & Industrial Trade Fairs Ltd	Гонконг, тел.: +852 02865/2633, факс: +582 02866/1770
BEARING *Международная выставка производственного оборудования и материалов*	октябрь	«	«
Factory Automation Asia *Международная выставка промышленной автоматизации, машиностроения, электротехники и промышленного обеспечения*	09.10—12.10	Hannover Fair China Ltd	Шанхай, тел.: +49511/819 995, факс: +49511/281 710
INTERKAMA ASIA *Международная выставка технологий промышленной автоматизации*	09.10—12.10	«	«
SHANGHAI METAL EXPO *Специализированная выставка металлургии, кузнечно-прессового производства, технологий обработки поверхности и металлообработки*	декабрь	CP Exhibition China Promotion Ltd	Гонконг, тел.: +852 2511/7427, факс: +852 2511/9692

Окончание

Куба***			
Metanica *Международная выставка металлургической промышленности, механики, электроники и технологий утилизации отходов производства*	октябрь	Pabexpo-Palacio de Convensiones de la Habana	Гавана, тел.: +5307/208 5131, факс: +5307/271 9065
Португалия***			
TPI International Exhibition for Technologies and Industrial Equipment *Международная выставка промышленных технологий и оборудования*	ноябрь	Reed Exhibition Companies	Лиссабон, тел.: +1416/491 7565, факс: +1416/491 7096
Румыния***			
TIB *Международная техническая выставка-ярмарка*	02.10—06.10	Romexpo S.A. Exhibitions Centre, Buchdrest International Fair	Бухарест, тел.:+4001/2243160, факс:+4001/2240400
Expotehnica *Выставка производственного оборудования, технологий и средств автоматизации*	ноябрь	Chamber of Commerce, Industry and Agriculture	Бакеу, тел.: +40(0)/69210503, факс: +40(0)/69211831
США***			
PAC *Специализированная выставка промышленного и металлорежущего оборудования*	ноябрь	Professional Trade Shows	Санта-Клара (шт. Калифорния), тел.:+1510/3543131, факс:+1510/3543159
Таиланд***			
METALEX *Международная выставка-конференция по машиностроительному и металлообрабатывающему оборудованию технологий промышленной автоматизации*	ноябрь	Reed Tradex Company	Бангкок, тел.: +662 636/7272, факс: +662 636/7282
Филиппины			
FACTORY AUTOMATION PHILIPPINES *Международная выставка производственного оборудования* **WELDING PHILIPPINES** *Выставка сварочных технологий*	25.10—28.10 25.10—28.10	Global Link Business Communications Phil.Inc. «	Манила, тел.: +632/7508588, факс: +632/7508585 «
Чехия***			
PRAGOKIGNA/TOOLTEC *Международная выставка производственного оборудования и инструмента для металло- и деревообрабатывающей промышленности*	октябрь	INCHEBA PRAHA spol.sro	Прага, тел.: +420 220/103 111, факс: +420 220/379 450
MSV *Международная специализированная выставка машиностроения*	01.10—05.10	BVV-Brneske veletrhy a vystavya.s	Брно, тел.: +42005/4115 1111, факс: +42005/4115 3070
Швеция***			
Tekniska Masson *Международная специализированная техническая выставка*	октябрь	Stockholmsmassan/Stockholm International Fairs	Стокгольм, тел.: +4608/749 4100, факс: +4608/992 044
Machine Tools Robots *Специализированная выставка машиностроения и робототехники*	октябрь	«	«
Scanautomatic *Международная специализированная выставка промышленной автоматизации*	09.10—12.10	Svenska Massan-Swedish Exhibition & Congress Centre	Готенбург, тел.: +46 031/708 8000, факс: +46031/160 330
Nanotec *Выставка, форум и конференция по нанатехнологиям*	16.10—18.10	Stockholmsmassan/Stockholm International Fairs	—
Scandinavian Technical Fair with Machine Tool *Выставка технического оборудования и инструмента*	16.10—19.10	«	«

* По данным выставочных центров Москвы.
** По данным справочника "Выставки и ярмарки – 2007. Россия, ближнее и дальнее зарубежье". М.: ИВА "ИнформЭКСПО", 2007. Тел./факс: (495) 105 7524.
*** По данным справочника "Навигатор ЭКСПО". Сер. специализированных справочников: Металлургия. Машиностроение. Сварка. Выставки и ярмарки 2007. Тел.: (495) 743 8044, факс: (495) 631 6382.

Возможны изменения.

Издательский центр "Технология машиностроения"

127018, Москва, ул. Октябрьская, 35

Сдано в набор 01.06.2007. Подписано в печать 17.07.2007. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 13,62. Заказ 08/07.

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"