



ТЕХНОЛОГИЯ

МАШИНОСТРОЕНИЯ

**ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ, НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ:**

Гл. редактор

В. А. Казаков

Зам. гл. редактора

Н. В. Посметная

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

Редакция:

*С. В. Богус,
Л. Т. Мартыненко,
Т. П. Маслик*

Компьютерная верстка:

И. С. Павлова

Дизайн обложки:

Е. С. Благовидов

Специальные
корреспонденты:

*А. Н. Иванов, А. В. Казаков,
Ан. А. Суслов*

Редактор-переводчик

Е. О. Егорова

Корректор

Е. Г. Волкова

**2 (56)
Февраль
2007**

УЧРЕДИТЕЛЬ:

Издательский центр

"Технология машиностроения"

Журнал издается при содействии

Министерства промышленности

и энергетики РФ,

Министерства образования и науки РФ,

Российской инженерной академии,

Российского научно-технического

общества машиностроителей,

ОАО «ЦНИИТМАШ»

Адрес для корреспонденции:

129626, Москва, а/я 01

Контактный тел.: (495) 796 2491

E-mail: tm@folium.ru

(с пометкой для журнала

"Технология машиностроения")

[Http://www.tm.folium.ru](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*

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Мийченко И. П., Костюченко В. Н. — Влияние температурных режимов отверждения на структуру имидоуглепластиков 5

ЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Кадошников В. И. — Работа кристаллизатора с щелевыми каналами машин непрерывного литья заготовок. 10

ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Губанов В. Ф. — Современный инструмент для выглаживания. 13

Ломов С. М., Ломова О. С., Макаренко В. В. — Обеспечение точности размеров формы прецизионных деталей при круглом шлифовании в центрах 14

СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Старков В. К., Рябцев С. А., Поклад В. А., Новиков В. С., Кайзер М., Костров С. В. — Сравнительный анализ работоспособности высокопористых эльборовых и корундовых кругов при профилейном зубошлифовании. 17

Чирков Г. В. — Влияние импрегнирования шлифовального круга на качество обработки 22

МЕХАНОСБОРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Медарь А. В. — Средства технологического оснащения сборочного производства. 24

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Хорев А. И. — Влияние комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла ($\alpha + \beta$)- и β -титановых сплавов 29

Козлов В. В., Третьяков И. В. — Устранение магнитного дутья постоянными магнитами при ремонте магистральных газопроводов 34

Алпеева Т. В., Котельников А. А. — Роботизированное производство сварных ферм для мачтовых сооружений. 38

ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Морозов В. В., Олейников В. Н. — Изучение упрочняющего механизма ионно-имплантированных сталей У8А, Х12М и Р6М5 41

Головизнин Б. Л., Масалков А. В., Кононский А. Ф., Пономарев С. А., Коротков В. А. — Совершенствование технологии износостойкой наплавки деталей автосцепного устройства грузовых вагонов на ФГУП "ПО "Уралвагонзавод" 42

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЙ

Плахтин В. Д., Паршин А. Н. — Синтез зацепления цилиндрических зубчатых колес с арочными бочкообразными зубьями 46

Трепов Д. А., Церулев М. В., Слепцов В. В. — Очистка и стерилизация стенок каналов малых диаметров в жидкой среде 53

МЕТРОЛОГИЯ

Загрутдинов Г. М., Бариева Г. З., Прищепа В. А. — Автоматизированная система метрологических исследований измерительных каналов информационно-измерительных систем 56

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ИСПЫТАНИЯ

Дурнов Ф. Ю., Кашин А. М. — Особенности автоматизированного УЗК листового проката 59

Степин В. В. — Методика повышения точности частотного анализа. 63

АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Волкова Г. Д., Володин Д. А. — Особенности разработки средств поддержки управления проектами при создании САПР машиностроительного назначения 66

Иванайский А. В., Константинов Ю. В., Иванайский В. А. — Математическая модель присоединенной кавитации в жидкости. 68

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Царьков А. В., Раевский В. А. — Оптимизация режимов сварки трубных досок теплообменных аппаратов методами компьютерного моделирования 71

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА

Смирнов В. В., Казаков В. А., Цукуров О. А. — Деятельность технического комитета по стандартизации "Сварка и родственные процессы" (ТК-364) по выполнению закона РФ "О техническом регулировании" 78

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Протасова С. В., Волкова Г. Д. — Анализ и концептуальное моделирование взаимосвязей проектных и управленческих функций в деятельности проектно-конструкторской организации 83

Орсиц Л. С., Федоров А. А. — Оценка эффективности и ранжирование инвестиционных проектов. 85

ОБРАЗОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Волчкевич И. Л. — Подготовка специалистов в области машиностроительного производства 88

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Потапова Г. С. — Содержание зарубежных журналов 90

ИНФОРМАЦИЯ

Добринский Е. С. — Крупнейшие компании машиностроения и автомобилестроения — участники рейтингов "Эксперт-400" и "Капитализация-200" 92

Иванов А. Н. — 5-й Международный форум "PCVEXPO—2006" 94

Суслов А. Ан. — 4-я Международная специализированная выставка "Робототехника—2006" 97



TEKHNLOGIYA

MASHINOSTROENIYA

REVIEW-ANALYTICAL, SCIENTIFIC-TECHNICAL
AND PRODUCTION JOURNAL

EDITORIAL BOARD:

V. A. Kazakov
Editor-in-Chief

N. V. Posmetnaya
Deputy Editor-in-Chief

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

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

Computerized making-up:
I. S. Pavlova

Cover design:
E. S. Blagovidov

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

Editor-translator
E. O. Egorova

Proof-reader
E. G. Volkova

2 (56)
February
2007

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](http://www.tm.folium.ru)

The journal is registered 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

CONTENTS

STRUCTURAL MATERIALS

- Miychenko I. P., Kostyuchenko V. N. — Influence of hardening temperature conditions on the imidocoal-plastic structure parameters 5

BLANK PRODUCTION

- Kadoshnikov V. I. — Operation possibility of the parallel-plate ducted blanks continuous casting mould 10

FORMING TECHNOLOGIES

- Gubanov V. F. — Recent smoothening tool 13
Lomov S. M., Lomova O. S., Makarenko V. V. — Dimensional accuracy assurance of high-precision parts forms at centre circular grinding 14

TOOLING PRODUCTION

- Starkov V. K., Ryabtsev S. A., Poklad V. A., Novikov V. S., Kayzer M., Kostrov S. V. — Working capacity comparative analysis of high-porous L-boric and corundum wheels at contour gear grinding 17
Chirkov G. V. — Grinding wheels impregnation influence on finish 22

MACHINING-AND-ASSEMBLY PRODUCTION

- Medar A. V. — Technological equipment for assembling 24

PERMANENT JOINTS PRODUCTION TECHNOLOGY

- Khorev A. I. — Complex alloying effect on the mechanical properties of the $\alpha + \beta$ -titanium welded joints 29
Kozlov V. V., Tretyakov I. V. — Magnetic blow-out elimination by permanent magnets at crosscountry gas line repair 34
Alpeyeva T. V., Kotelnikov A. A. — Welded girders robotic production for mast structures 38

MODIFEING PROCESSES OF MACHINE PARTS SURFACES

- Morozov V. V., Oleynikov V. N. — Hardening mechanism study of the ion-implanted steels Y8A, X12M and P6M5 41
Goloviznin B. L., Masalkov A. V., Kononsky A. F., Ponomariov S. A., Korotkov V. A. — Wear-resistant building-up process perfection for the goods vans automatic coupler equipment parts at the "PO "Uralvagonzavod", FGUP 42

SPECIAL TECHNOLOGIES

- Plakhtin V. D., Parshin A. N. — Arch barrel-type teeth spur gear engagement synthesis 46
Trepov D. A., Tserulev M. V., Sleptsov V. V. — Minor diameter channels walls cleaning and sterilization in liquid medium 53

METROLOGY

- Zagrutdinov G. M., Bariyeva G. Z., Prischepa V. A. — Computer-aided system for metrological research of information-measuring system measuring channels 56

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

- Durnov F. Yu., Kashin A. M. — Special properties of the sheet computer-aided ultrasonic check 59
Stepin V. V. — Procedure of the frequency estimation accuracy increase 63

PROCESSES AUTOMATION AND COMPUTERIZATION

- Volkova G. D., Volodin D. A. — Project management supportive tools development features at creating CAD systems for machine industry 66
Ivanaysky A. V., Konstantinov Yu. V., Ivanaysky V. A. — Mathematical model of the liquid joined cavitation 68

POWER INDUSTRY

- Tsarkov A. V., Rayevsky V. A. — Effective conditions specification for the heat-exchange apparatus tube plates welding by computer simulation 71

STANDARDIZATION, CERTIFICATION, QUALITY SYSTEMS

- Smirnov V. V., Kazakov V. A., Tsukurov O. A. — The "Welding and related processes" (T-364) technical committee for standardization activity on implementation of the RF law "On the technical control" 78

ECONOMICS AND PRODUCTION ORGANIZATION

- Protasova S. V., Volkova G. D. — Analysis and conceptual modelling of interrelations between project and management functions in the developer and design office activity 83
Orsik L. S., Fiodorov A. A. — Investment projects efficiency rating and ranking 85

EDUCATION AND PERSONNEL TRAINING

- Volchkevich I. L. — Personnel training for machine industry 88

FOREIGN EXPIRIENCE

- Potapova G. S. — Foreign journals contents 90

INFORMATION

- Dobrinsky Ye. S. — Engineering and automotive industries first-rate companies — participants of the "Expert-400" and "Capitalization-200" ratings 92
Ivanov A. N. — The 5th International forum "PCVEXPO'2006" 94
Suslov A. An. — The 4th International specialized exhibition "Robotics'2006" 97
-

И. П. МИЙЧЕНКО, канд. техн. наук, В. Н. КОСТЮЧЕНКО, канд. техн. наук
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

Влияние температурных режимов отверждения на структуру имидоуглепластиков

Анализ применения конструкционных полимерных материалов показывает, что для изготовления теплонагруженных элементов конструкций целесообразно использовать армированные имидопласты на основе имидных мономерных связующих типа АПИ (зарубежные аналоги PMR, LARC), которые за счет образования после отверждения жесткоцепной сетчатой структуры обеспечивают работоспособность изделию при температурах до 450 °С на воздухе. Проблема сочетания необходимой технологичности связующих АПИ и высокой термоустойчивости сетчатых имидных матриц АПИ практически решена за счет использования принципа полимеризации мономерных реагентов на поверхности наполнителя (принцип PMR) и образования при отверждении сетчатой структуры жесткоцепной имидной матрицы. Однако остается нерешенной проблема обеспечения высоких показателей деформационно-прочностных свойств армированных имидопластов на их основе.

Высокие значения деформационно-прочностных свойств пластиков напрямую зависят от стойкости полимерных матриц против роста трещин, т. е. их трещиностойкости, и величины усадок в процессе отверждения связующих и возникновения в них остаточных микронапряжений различного характера, что является общим для стеклообразных густосетчатых полимеров, причем для имидных это усугубляется жесткоцепным характером полимерных цепей. Среди факторов, определяющих уровень остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, важное значение имеет молекулярное строение матрицы и ее трещиностойкость. Молекулярное строение матрицы формируется в процессе отверждения и зависит от температурных условий этого процесса. Чем более густая сетка и более жесткие (малоподвижные) межузловые цепи образуются при отверждении, тем более высокие остаточные напряжения возникают в материале в процессе получения изделия. Температурные режимы отверждения существенно влияют на формирование структуры сетчатой имидной матрицы в материале и, соответственно, способность материала воспринимать внешние механические нагрузки, так как суммарный уровень остаточных напряжений, возникающих при формировании изделия, может превысить разрушающее напряжение матрицы или границы раздела (межфазного слоя), что приведет к снижению надежности изделия и нарушению целостности материала.

Повышение гибкости цепей между узлами поли-

мерной сетки или уменьшение частоты узлов за счет химической модификации исходного состава связующего обычно малоэффективно, так как повышение трещиностойкости в этом случае сопровождается резким снижением модуля упругости и теплостойкости. Наибольший эффект повышения трещиностойкости без снижения жесткости, прочности и теплостойкости густосетчатых матриц и пластиков на их основе достигается методом дисперсной эластификации стеклообразных полимеров.

В анизотропных материалах наиболее чувствительными к остаточным напряжениям оказываются их сдвиговые характеристики $\tau_{сд}$ как на границе раздела волокно—матрица, так и на межслоевой границе в композите. Жесткоцепная структура образующегося на поверхности наполнителя в процессах получения полуфабрикатов и формования изделий сетчатого полиимида АПИ обуславливает высокий уровень остаточных напряжений, что связано прежде всего с высокими усадками при формировании сетчатой полиимидной фазы и различием термоупругих свойств матрицы и, например, углеродного наполнителя.

Исследовали имидное связующее АПИ-3, представляющее 60 %-ный раствор имидообразующих мономеров в активном растворителе (фуриловом спирте). В качестве эластификатора использовали низкомолекулярный жидкий бутадиенакрилонитрильный каучук СКН-30КТР с концевыми карбоксильными группами (связующее АПИ-3К). Оптимальное содержание каучука составляет 10 % массы отвержденного АПИ. В качестве наполнителей использовали углеродные ленты ЛУ-П-01 и ЭЛУР-П-008, содержание которых в углепластике составляло 60 %. После отверждения углепластики имели пористость не более 3 %.

Влияние эластификатора на процессы перевода имидообразующих мономеров АПИ в сетчатый полиимид исследовали с помощью метода механической спектроскопии, термографическими методами (ДТА, ДТГА) и микроструктурным анализом. Методом механической спектрометрии с применением прямого крутильного маятника на микропластиках, полученных пропиткой углеродного волокна выбранными составами связующих при нагреве от 20 до 500 °С со скоростью 4—6 °С/мин, оценивали вязкоупругие свойства по изменению относительной жесткости IgG и тангенса угла механических потерь $tg\delta$. По данным вязкоупругих свойств определяли характеристические температуры имидизации (образова-

ния олигоимида на поверхности углеродного наполнителя), отверждения, термоокислительной деструкции и влияние на эти процессы модифицирующего компонента — эластификатора. Для определения кинетики отверждения использовали динамический изотермический режим температурной обработки имидизированных микропластиков. По кинетическим зависимостям определяли температурно-временные параметры процесса отверждения: оптимальную температуру отверждения $T_{\text{отв.опт}}$, время вязкотекучего состояния $\tau_{\text{вТС}}$, время отверждения $\tau_{\text{отв}}$. Термомеханические свойства микропластиков на основе отвержденных имидных матриц определяли при нагреве от 20 до 500 °С со скоростью 4—6 °С/мин. По термомеханическим зависимостям определяли температуру стеклования $T_{\text{С}}$, термической обработки $T_{\text{ТО}}$ и термоокислительной деструкции $T_{\text{дест}}$.

Влияние эластификатора на термостойкость имидных матриц оценивали по данным термогравиметрического анализа (ТГА) на порошках имидных матриц, предварительно отвержденных при разных температурах.

Для оценки трещиностойкости ненаполненных отвержденных матриц АПИ использовали образцы в виде двухконсольной балки (ДКБ). Параметры прямоугольных образцов: длина трещины 20 мм, толщина образца в зоне трещины 1,5 мм, ширина пропила в зоне трещины 2 мм, толщина образца 5 мм, ширина образца 30 мм, длина образца 150 мм.

Для оценки остаточных напряжений использовали метод упругой балки. Модельные образцы ИУП для испытаний представляли ортотропные пластины на основе углеродной ленты. В качестве слоя подложки использовали препрег на основе АПИ-3 (продольный слой), а в качестве слоя "покрытия" (поперечный слой) — препрег на основе АПИ-3 (1-й тип образцов) и препрег на основе эластифицированного АПИ-3К (2-й тип образцов). Содержание связующего в препрегах составляло 35—40 %.

Расчет возникающих $\sigma_{\text{ост}}$ проводили по прогибу подложки по формуле

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{2f\delta}{l^2} \left[\frac{E_1}{3} + 4E_2 \right], \quad (1)$$

где δ — толщина монослоя в образце, f — прогиб образца.

Для расчетов принимали $E_1 = E_{//} = E_{\text{в}\phi_{\text{в}}} + E_{\text{м}\phi_{\text{м}}}$; $E_2 = E_{\perp} = E_{\text{в}}E_{\text{м}}/(E_{\text{в}\phi_{\text{в}}} + E_{\text{м}\phi_{\text{м}}})$, где E , ϕ — модуль упругости и объемное содержание волокна (индекс "в") и матрицы (индекс "м") соответственно; "//" и " \perp " — продольная и поперечная ориентация волокнистого наполнителя в слоях. Длина образцов $l = 150$ мм, ширина $h = 10$ мм.

Сдвиговую прочность определяли при испытании на изгиб короткой балки при трехточечной схеме нагружения на образцах длиной 50 мм, шириной 5—6 мм, толщиной 5 мм; на базе (расстояние

между опорами) 40 мм. Для испытаний использовали разрывную машину TIRA test 2300, скорость нагружения составляла 2 мм/мин.

Результаты исследования влияния низкомолекулярных каучуков на процессы формирования сетчатого полиимида АПИ методом механической спектроскопии показали, что введение эластификатора не изменяет механизм химических реакций образования полиимида из смеси имидообразующих мономеров на поверхности наполнителя. Присутствие эластификатора лишь незначительно изменяет характеристические температуры образования олигоимида и его отверждения. В сложной системе идут последовательно, но с разными скоростями, реакции образования собственно олигоимида (через стадию формирования олигоамидокислоты и ее имидизации), сетчатого полиимида, полимера фурилового спирта (сначала линейного, а затем по мере повышения температуры и сетчатого, фуранового полимера). Очевидно, что при этом образуется сложная сетчатая структура сополимерного типа, так как возможно взаимодействие фуранового полимера (ФП) и каучука по двойным связям, ФП и олигоимида по двойным связям ФП и эндоцикла, а также каучука и олигоимида по двойным связям каучука и эндоцикла. Образование каждой из перечисленных структур регистрируется на кинетических зависимостях $\text{tg } \delta$ и $\text{lg } G$ в виде пиков и перегибов соответственно. При повышении температур отверждения возрастает скорость процесса, что приводит к отсутствию участка вязкотекучего состояния при температуре отверждения, а процесс отверждения завершается за 2 мин.

Так же сложно, как и формирование молекулярной структуры при отверждении эластифицированных имидных связующих, проходит образование фазовой структуры полимера: на зависимостях относительной жесткости $\text{lg } G$ в области температур выше 270 °С прослеживается наличие двух ступеней, а на кривых $\text{tg } \delta$ — двух пиков, которые можно связать с процессами выделения ФП и каучука в самостоятельные фазы. Причем первый пик в случае АПИ-3К можно отнести к процессу выделения каучука, а второй — ФП. Выделение каучука и фуранового полимера в самостоятельные фазы происходит еще до достижения температуры отверждения. Присутствие трех фаз в отвержденном полимере подтверждается появлением трех температур стеклования на динамических термомеханических зависимостях $\text{tg } \delta$ — T (рис. 1).

Введение в состав АПИ-3 эластификатора влияет на густоту образующейся пространственной сетки химических связей. При сопоставимых температурных условиях отверждения для состава АПИ-3К достигаемая степень отверждения ниже, чем для АПИ-3. Так, степень отверждения АПИ-3К при температуре 310 °С составляет 55 %, а для АПИ-3 — 75 %

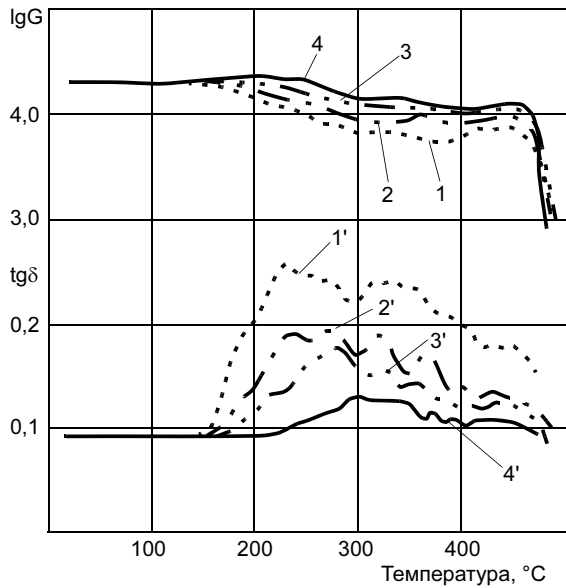


Рис. 1. Динамические термомеханические зависимости отвержденного АПИ-ЗК при 270 (1, 1'), 310 (2, 2'), 330 (3, 3') и 360 (4, 4') °С: 1—4 — lg G; 1'—4' — tg δ

(при $T_{отв} = 300$ °С), при $T_{отв} = 330$ °С степень отверждения повышается до 74 и 80 % соответственно. При повышении температур отверждения образуется жесткая структура с температурой стеклования, превышающей температуру отверждения (табл. 1). Присутствие эластификатора несколько снижает T_c имидной матрицы, но не снижает ее термостойкости (табл. 2).

Эластифицирование структуры матриц АПИ приводит к повышению их трещиностойкости, при этом использование в качестве эластификаторов низкомолекулярных каучуков позволяет реализовать принцип дисперсной эластификации за счет выделения каучука при отверждении имидной матрицы в самостоятельную фазу, химически соединенную с основным полимером (рис. 2), размер и полидисперсность частиц которой зависит от исходной концентрации каучука и условий процесса отверждения.

При исследовании влияния скорости приложения нагрузки на характер роста трещин установили, что при высоких скоростях приложения трещинодвижущих сил (10^{-2} — 10^{-1} МПа · м^{1/2}/с) характер роста трещин в присутствии каучука СКН-30КТР не изменяется, а значение коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} увеличивается в 2,0—2,5 раза.

Сдвиговая прочность имидоуглепластиков на основе эластифицированных матриц АПИ повышается в 1,3—1,4 раза и составляет для имидоуглепластиков на основе углеродной ленты ЛУ-П и матрицы АПИ-3 при 20 °С 49,7 МПа, при 300 °С — 45,8 МПа, а для ИУП на основе АПИ-3К — 71,0 и 57,2 МПа соответственно. Это обусловлено прежде всего снижением напряженности структуры сетчатой жесткоцепной имидной матрицы в присутствии эластифицирующего компонента.

Таблица 1

Матрица	$T_{отв}$, °С	T_c , °С
АПИ-3	300	350
	330	350
	350	400
АПИ-3К	310	315
	330	355
	360	370

Таблица 2

Состав	$T_{отв}$	$T_{то}$	T_0	T_5	T_{10}
	°С				
АПИ-3	330	—	150	280	350
АПИ-3	330	350	350	440	480
АПИ-3К	330	—	195	305	360
АПИ-3К	330	370	350	445	485

Обозначения: $T_{то}$ — температура дополнительной термической обработки после отверждения; T_0 — температура начала потери массы; T_5 , T_{10} — температуры 5 и 10 %-ной потери массы.

Известно, что остаточные напряжения, возникающие в пластиках, являются результатом наличия в материале усадочных (химических) и температурных напряжений, и часто очень трудно оценить вклад каждого из них в суммарную долю остаточных напряжений [1—3]. При этом в эластифицированной имидной матрице АПИ-3К, состоящей из собственно имидной фазы, фаз каучука и фуранового полимера, возникают собственные остаточные напряжения, а в углепластике на их основе появляются микронапряжения на границе раздела волокно—многофазная матрица, связанные с гетерогенностью пластика. Наличие слоистой структуры имидоуглепластика обуславливает возникновение межслоевых остаточных напряжений, величина которых зависит от ориентации волокон в слоях. Связующие АПИ являются гетерофазными системами, состоящими из микрообъемов с нерегулярной упаковкой макромолекул. Объемные изменения, происходящие при отверждении и формиро-

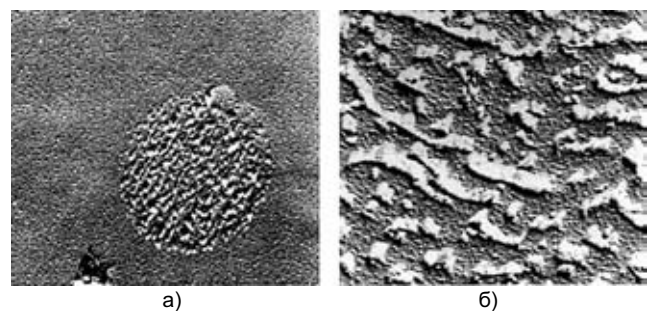


Рис. 2. Микроструктура отвержденного АПИ-3К: а — частица каучука в матрице АПИ (× 14 700); б — микроструктура частицы каучука (× 64 000)

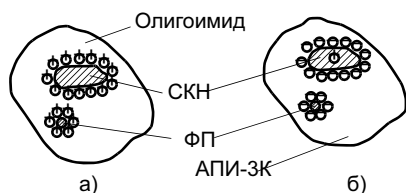


Рис. 3. Распределение напряжений в связующем АПИ-ЗК в процессе отверждения (а) и в матрице АПИ-ЗК после отверждения (б)

вании структуры этих фаз, различаются по величине и поэтому в материале возникают значительные межфазные напряжения. При отверждении из-за усадки имидной матрицы на частицы каучука и фуранового полимера действуют напряжения растяжения, а сами частицы оказываются сжатыми (рис. 3).

Усадочные остаточные напряжения снижаются в АПИ-З и АПИ-ЗК пропорционально объему, занимаемому фазами каучука и фуранового полимера, поэтому очевидно, что $\sigma_{\text{ост.ус АПИ-З}} > \sigma_{\text{ост.ус АПИ-ЗК}}$. После завершения процесса отверждения знак действия напряжений меняется на противоположный из-за разности температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР): $\alpha_{\text{СКН}} \sim 200 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$, $\alpha_{\text{ПИ}} \sim 40 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$, $\alpha_{\text{ФП}} \sim 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$, поэтому вокруг частиц каучука и фуранового полимера создается поле сжимающих напряжений. Традиционный механизм повышения трещиностойкости эластифицированных сетчатых полимеров связан с потерей энергии трещины в объеме эластичной фазы за счет развития вынужденной эластической деформации. Повышение трещиностойкости эластифицированной имидной матрицы АПИ-ЗК наряду с традиционным механизмом объясняется тем, что при вхождении трещин в зону поля сжимающих напряжений происходит резкое снижение трещиновдвигущих сил и трещина останавливается в результате взаимодействия полей растягивающих и сжимающих напряжений.

Анализ напряженного состояния на уровне матрица—волокно характеризуется наличием микронапряжений на границе раздела. Температурные остаточные напряжения:

$$\sigma_{\text{ост.т}} = E_{\text{м}}(\alpha_{\text{м}} - \alpha_{\text{в}})\Delta T, \quad (2)$$

где $\Delta T = T_{\text{с}} - T_{\text{комн}}$.

Учитывая, что каучук и фурановый полимер в данном случае выполняют роль дисперсного наполнителя с более высокими значениями ТКЛР, чем имидной матрицы, то остаточные температурные напряжения в ИУП на основе АПИ-ЗК будут выше, чем в ИУП на основе АПИ-З, так как

$$\sigma_{\text{ост.т АПИ-З}} = E_{\text{м}}[\alpha_{\text{и}} - (\alpha_{\text{ФП}} + \alpha_{\text{в}})]\Delta T; \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{ост.т АПИ-ЗК}} = E_{\text{м}}[\alpha_{\text{и}} - (\alpha_{\text{СКН}} + \alpha_{\text{ФП}} + \alpha_{\text{в}})]\Delta T, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{ост.т}}$ — остаточные температурные напряжения в имидоуглепластиках на основе АПИ-З и АПИ-ЗК соответственно; индексы "и" — имидная матрица, "в" — углеродное волокно, "ФП" — фурановый полимер, "СКН" — каучук СКН-30 КТР.

Поскольку $\alpha_{\text{СКН-30}} + \alpha_{\text{ФП}} > \alpha_{\text{и}}$, то в матрице вокруг частиц дисперсного наполнителя возникает поле сжимающих остаточных температурных напряжений, которые в совокупности с напряжениями сжатия, действующими на волокно по границе раздела, способствуют увеличению прочности сцепления волокна с матрицей и значительно снижают действие наиболее опасных для углепластиков осевых и окружных остаточных напряжений, способствующих растяжению полимера. В ИУП АПИ на основе однонаправленных углеродных лент появляются межслоевые напряжения, которые в случае использования ортотропной схемы укладки слоев будут максимальны. После отверждения в процессе охлаждения в слое с продольной ориентацией возникают остаточные напряжения растяжения, а в слое с поперечной ориентацией — сжатия. Напряжения растяжения и сжатия в слоях образца, находящегося в оснстке, равномерно распределены и скомпенсированы. В свободном состоянии в образце максимальные остаточные напряжения выражаются в виде деформации (изгиба), при этом сжимающие и растягивающие остаточные напряжения взаимно уравновешены, а их значение минимально. Температурные остаточные напряжения могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\sigma_{\text{ост.т}} = E_{\perp}(\alpha_{\perp} - \alpha_{\parallel})\Delta T, \quad (5)$$

где индексы " \perp " и " \parallel " относятся к поперечному и продольному слоям образца соответственно; E — модуль упругости слоя.

Так как уровень остаточных температурных напряжений в эластифицированной матрице ниже, чем в неэластифицированной, то остаточные температурные напряжения в имидоуглепластике на основе АПИ-ЗК будут ниже, чем в имидоуглепластике на основе АПИ-З. Их снижение происходит и за счет более высокого поля сжимающих напряжений в эластифицированной матрице, которое уменьшает действие напряжений растяжения в слое с продольной ориентацией углеродных волокон.

Уровень остаточных напряжений в образцах (двухслойных пластинах) на основе связующих АПИ-З и АПИ-ЗК описывается уравнениями:

$$\sigma_{\text{ост АПИ-З}} = \sigma_{\text{ост.т АПИ-З}} + \sigma_{\text{ост.ус АПИ-З}} = E_{\perp \text{ АПИ-З}}(\alpha_{\perp \text{ АПИ-З}} - \alpha_{\parallel \text{ АПИ-З}})\Delta T + E_{\perp \text{ АПИ-З}} Y_{\text{ АПИ-З}}; \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{ост АПИ-ЗК}} = \sigma_{\text{ост.т АПИ-ЗК}} + \sigma_{\text{ост.ус АПИ-ЗК}} = E_{\perp \text{ АПИ-ЗК}}(\alpha_{\perp \text{ АПИ-ЗК}} - \alpha_{\parallel \text{ АПИ-ЗК}})\Delta T + E_{\perp \text{ АПИ-ЗК}} Y_{\text{ АПИ-ЗК}}, \quad (7)$$

где Y — усадка связующего при отверждении.

Уровень остаточных напряжений в имидоуглепластиках на основе АПИ-З выше, чем на основе АПИ-ЗК, так как основную роль играют остаточные температурные напряжения, а суммарный вклад усадочных напряжений при этом незначителен.

Экспериментальное определение остаточных напряжений показало, что их низкий уровень в имидоуглепластиках на основе АПИ-З при $T_{\text{отв}} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 3

$T_{\text{отв}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{ост}}, \text{МПа}$		
	После отверждения	После термической обработки при 300/330 $^\circ\text{C}$	
		Без давления	Под давлением 0,3 МПа
250	13,39	14,95/14,82	12,07/11,90
270	19,78	21,88/21,62	18,16/17,61
300	17,32	17,74/17,52	17,23/17,01
330	13,45	13,60/13,33	13,17/12,84

Таблица 4

$T_{\text{отв}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{ост}}, \text{МПа}$		
	После отверждения	После термической обработки при 300/330 $^\circ\text{C}$	
		Без давления	Под давлением 0,3 МПа
270	17,15	19,30/18,97	15,08/14,68
310	14,43	15,00/14,70	13,87/13,58
330	12,92	13,13/12,74	12,61/12,39
360	11,88	11,69/11,55	11,47/11,23

(табл. 3) обусловлен тем, что при этой температуре процесс отверждения не развивается или идет с очень малой скоростью и возникающие при этом остаточные напряжения успевают релаксировать. При дальнейшем повышении температуры процесс формирования сетчатого полимера в результате отверждения ускоряется, что приводит к резкому возрастанию значений $\sigma_{\text{ост}}$.

Максимальный уровень $\sigma_{\text{ост}}$ в образцах, отвержденных при 270 $^\circ\text{C}$, обусловлен тем, что при данной температуре начинается процесс раскрытия двойных связей фуранового полимера и активация двойных связей эндоцикла. Это приводит к образованию сетчатого фуран-имидного полимера и одновременно наблюдается выделение фуранового полимера в самостоятельную фазу.

Процесс формирования сетчатого полиимида на основе связующего АПИ-3 сопровождается усадочными явлениями, приводящими к повышению остаточных напряжений в структуре ИУП ($\sigma_{\text{ост}} = 19,78 \text{ МПа}$, см. табл. 3). При введении в состав матрицы эластичной фазы (АПИ-ЗК) общий уровень остаточных напряжений уменьшается (табл. 4).

При дополнительной термической обработке одновременно идут процессы доотверждения, приводящие к повышению степени отверждения, и процессы релаксации. Установили, что дополнительная термическая обработка без давления при температуре, близкой $T_{\text{отв}}$, во всех случаях приводит к увеличению остаточных напряжений, что обусловлено более высокой скоростью химической усадки, чем скорость релаксационных процессов.

Использование внешнего давления при термической обработке ($p = 0,3 \text{ МПа}$) ИУП снижает остаточные напряжения, что очевидно связано с возникновением в образцах ИУП механических дефектов (микротрещин), которые облегчают прохождение релаксационных процессов в матрице, но отрицательно сказываются на эксплуатационных характеристиках ИУП. Введение каучука в качестве эластификатора в состав АПИ-3 снижает температурные остаточные напряжения после завершения процесса отверждения из-за изменения ТКЛР материала, поэтому общий уровень остаточных напряжений для АПИ-ЗК ниже, чем для АПИ-3 при повышенных

температурах отверждения ($T_{\text{отв}} = 330 \text{ }^\circ\text{C}$ для АПИ-3 и $T_{\text{отв}} = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ для АПИ-ЗК).

ВЫВОДЫ

1. Эластификация матрицы АПИ-3 низкомолекулярным каучуком СКН-30 приводит к повышению трещиностойкости и сдвиговых характеристик имидоуглепластика (ИУП) АПИ без снижения их термостойкости. В процессе отверждения ИУП на основе АПИ-3 и АПИ-ЗК возникают остаточные напряжения на уровне, характерном для традиционных эпоксиластов. Введение каучука в качестве эластификатора в состав АПИ-3 значительно снижает остаточные напряжения.

2. Присутствие эластификатора каучука СКН-30, выполняющего роль "полимерного наполнителя" на стадии образования олигоимида, снижает усадочные остаточные напряжения, а также уменьшает температурные остаточные напряжения после завершения процесса отверждения из-за изменения ТКЛР материала, поэтому общий уровень остаточных напряжений для АПИ-ЗК ниже, чем для АПИ-3.

3. В процессе отверждения образуется равновесная структура сетчатого жесткоцепного полиимида как без эластификатора, так и в присутствии последнего. Характер изменения остаточных напряжений при повышении температур показывает, что процесс отверждения ИУП на основе АПИ-ЗК можно проводить в две стадии: при формировании изделия при пониженных температурах (310 $^\circ\text{C}$) и последующей термической обработке изделия без давления (или при контактном давлении для сохранения формы изделия) при более высоких температурах (330 или 360 $^\circ\text{C}$). Применение двухстадийного процесса позволит получать ИУП с пониженным уровнем остаточных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов В. М.* Остаточные напряжения в изделиях из композиционных материалов // Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / Под. ред. Е. Б. Тростянской. М.: Химия, 1974. С. 46—74.
2. *Виноградов В. М.* Остаточные напряжения в изделиях из наполненных пластических масс // Пластические массы. 1976. № 11. С. 51—54.
3. *Тростянская Е. Б., Виноградов В. М., Якусевич В. И.* Снижение остаточных напряжений в изделиях из пластических масс // Пластические массы. 1975. № 4. С. 50—52.

В. И. КАДОШНИКОВ, канд. техн. наук

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова

Работа кристаллизатора с щелевыми каналами машин непрерывного литья заготовок

Кристаллизатор является наиболее ответственным узлом машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), в нем формируется оболочка слитка и отводится 20—25 % теплоты кристаллизации металла. От тепловой работы кристаллизатора существенно зависит его стойкость.

Существует три типа кристаллизаторов: сборные, блочные и гильзовые. На ММК применяют сборные кристаллизаторы, состоящие из рабочих стенок толщиной 70 мм, каждая из которых крепится шпильками к жестким стальным плитам. Воду пропускают по каналам диаметром 20 мм, высверленным в стенке. Этот способ охлаждения не очень эффективен, так как сверление отверстий существенно усложняет процесс их изготовления и очистки от кальцинатов при ремонтах. Кроме того, стойкость кристаллизаторов с медными рабочими стенками в условиях высокопроизводительной работы МНЛЗ явно недостаточна. При высоких скоростях разлива температура рабочей поверхности кристаллизатора достигает величин, приближающихся к температуре разупрочнения меди. Низкая износостойкость меди приводит к повышенному износу ее рабочей поверхности (наиболее значительно в нижней части кристаллизатора) и особенно поверхности узких стенок. На практике во избежание прорывов корочки слитка при достижении определенного износа медных стенок кристаллизатор снимают и направляют на перестройку.

Известны более простые в эксплуатации и изготовлении составные кристаллизаторы, состоящие из медной рабочей стенки с фрезерованными щелевыми каналами и стального внешнего корпуса. Размеры канала выбираются таким образом, чтобы суммарное живое сечение для охлаждающей воды было такое же, как и в случае использования цилиндрических каналов.

Можно выделить основные направления решения проблемы стойкости рабочих стенок кристаллизатора — это применение новых материалов, а также конструктивные изменения.

Многими исследователями опробованы кристаллизаторы с рабочими стенками из сплавов меди и других материалов. Из медных сплавов М(г/д); МСр(х/д); МН₂,5КрХ(т/о); БрХ(т/о); БрХЦр(т/о); БрЦр(х/д); МЗРЖ(т/к) с температурой разупрочнения 250, 350, 550, 500, 550, 500 и 600 °С соответственно, рекомендуемых институтом "Гипроцветмет-

обработка" для изготовления рабочих стенок кристаллизаторов, широкое распространение получил сплав меди с серебром МСр (0,1 % Ag), который в большинстве случаев используют для изготовления узких стенок слябовых кристаллизаторов. Сплав МСр при незначительном снижении теплопроводности обладает по сравнению с медью более высокой прочностью и температурой разупрочнения, благодаря чему удалось повысить износостойкость узких стенок.

В настоящее время на ММК для изготовления узких стенок кристаллизатора используют медный сплав МС (0,8—1,2 % Ag), отличающийся высокой стоимостью. Норма расхода меди 6,4 кг на 1000 т отлитой стали. Если учесть, что масса меди узких стенок кристаллизатора составляет всего около одной десятой общей массы рабочих стенок кристаллизатора, то перевод на новый сплав повлечет за собой вложение значительного капитала.

Один из наиболее перспективных путей повышения стойкости рабочих стенок кристаллизатора — повышение интенсивности отвода теплоты из расплава путем создания стенок новых конструкций. Отвод теплоты от металла, подаваемого в полость кристаллизатора, осуществляется водой, которая циркулирует в каналах, расположенных вблизи рабочих поверхностей медных плит. В настоящее время применяют кристаллизаторы как с прямоугольными фрезерованными каналами в медных плитах со стороны стального корпуса, так и со сверленными каналами. В отечественной практике на слябовых МНЛЗ применяют кристаллизаторы исключительно со сверленными каналами, которые имеют ряд эксплуатационных преимуществ, обладая большей жесткостью и надежностью в работе.

При изготовлении радиальных кристаллизаторов сверленные каналы для циркуляции воды предварительно выполняют в плоской заготовке, которую затем изгибают, придавая ей необходимую форму по заданному радиусу. Этим обеспечивается одинаковое расстояние от каналов до рабочей поверхности по высоте кристаллизатора.

Расстояние от потока охлаждающей воды в каналах до рабочей поверхности кристаллизатора из-за высокой теплопроводности меди мало влияет на процесс теплопередачи, но с увеличением этого расстояния возрастает температура медной стенки, что приводит к снижению механических свойств

материала. Поэтому расстояние от каналов с водой до рабочей поверхности кристаллизатора необходимо выбирать таким, чтобы температура стенки на поверхности, контактирующей с разливаемым металлом, не превышала температуру разупрочнения материала. Вместе с тем должно быть обеспечено и максимально возможное количество перестрожек рабочей поверхности при ремонтах для восстановления профиля внутренней полости кристаллизатора.

Существуют преимущества и недостатки рабочих стенок кристаллизатора со щелевыми каналами в сравнении со стенками с цилиндрическими каналами. К преимуществам относятся простота изготовления и доступ при ремонтах, экономия не менее 30 % меди при сохранении расстояния от рабочей поверхности до поверхности теплоотводящих каналов, повышение количества перестрожек, т. е. увеличение срока службы кристаллизатора при сохранении толщины его стенок на уровне 70 мм, понижение температурных характеристик рабочей поверхности на 25—40 °С при прочих равных условиях.

Недостатком является возможность раскрытия стыка под действием на стенку сил со стороны воды, прокачиваемой по каналам под давлением.

Для безаварийной работы кристаллизаторов необходимо определить момент затяжки шпильки, обеспечивающей нераскрытие стыка от давления в каналах при номинальном давлении в водяной системе $p_B = 0,6$ МПа и максимальном давлении воды $p_{max} = 1,2$ МПа, запас прочности на срез резьбы в медной стенке. Расчет необходимо произвести для шпильки М16 с учетом внешнего усилия сдвига Q_{max} от действия сил трения слитка о стенки кристаллизатора, равного $20t$.

Расчет производили для кристаллизатора со следующими геометрическими параметрами: длина стенки кристаллизатора L , мм; длина малой стенки кристаллизатора L_M , мм; высота стенки кристаллизатора B , мм; число шпилек $n_{шп}$ в плите размером LB ; ширина вертикальных каналов h_{BK} , мм; число вертикальных каналов n_{BK} ; длина вертикальных каналов L_{BK} , мм; ширина горизонтальных каналов для воды $h_{ГК}$, мм; число горизонтальных каналов $n_{ГК}$; длина горизонтальных каналов $L_{ГК}$, мм; число дюбелей $n_{дюб}$; внутренний диаметр обводного канала для воды под дюбель $d_{ВН}$, мм; наружный диаметр обводного канала для воды под дюбель $d_{НАР}$, мм; расстояние между осями канала под уплотнение по длине L_y , мм; расстояние между осями канала под уплотнение по ширине B_y , мм; ширина канала под уплотнение h_y , мм.

В таблице приведен предел прочности σ_B для различных медных сплавов.

Температура, °С	σ_B , МПа				
	М2	М	МС	МЦ	НМС
20	230	220	440	230	750
100	225	—	—	—	—
200	211	—	—	—	—
300	198	150	310	—	650

Напряжение среза $\tau_{ср} = (0,2 \div 0,3)\sigma_r$; предел текучести $\sigma_r = \sigma_B$. Коэффициент трения для пары сталь—сталь $f = 0,15$; сталь—медь — $f_M = 0,2$ [2].

Параметры резьбовых соединений: глубина завинчивания шпилек в плиту 16 мм, глубина отверстий под резьбу 22 мм. Шпилька М16-6g · 120,58 (58 — класс прочности; ГОСТ 22034—88), материал — сталь 20 с $\sigma_B = 500$ МПа, $\sigma_r = 400$ МПа.

Для определения сил, отрывающих стенку кристаллизатора от стальной плиты, определяем:

- общую площадь плиты по формуле $S_n = LB$;
- площадь смоченной поверхности со стороны стальной плиты без учета мест под дюбели

$$S_B = n_{BK} h_{BK} L_{BK} + n_{ГК} h_{ГК} L_{ГК};$$

- площадь с учетом мест под дюбели

$$\Delta S = n_{дюб} \left[\frac{\pi}{4} (d_{НАР}^2 - d_{ВН}^2) - 2d_{НАР} h_{BK} \right];$$

- площадь смоченной водой поверхности со стороны стальной плиты $S_{ВИ} = S + \Delta S$;
- площадь, занимаемая уплотнителем,

$$S_y = 2(L_y + B_y)h_y;$$

- площадь, занимаемая отверстиями под шпильки,

$$S_{ш} = n_{шп} \frac{d_{ш0}^2 \pi}{4};$$

- площадь соприкосновения медной и стальной поверхностей $S_{СТ} = S_n - S_{ВИ} - S_y - S_{ш}$;

- силу нормального давления со стороны воды на стальную плиту $F_H = S_{ш} P_B$;

- среднюю растягивающую силу на одну шпильку

$$\bar{F}_1 = F_H / n_{шт}. \quad (1)$$

Шпильки и каналы для воды в действительности расположены неравномерно по плите, учесть это можно с помощью коэффициента неравномерности K_0 : $F_1 = \bar{F}_1 K_0$. Для определения K_0 разбиваем всю плиту площадью S_n на K квадратов одинаковой площади, тогда $K_0 = K_{i\max} / K_{i\text{ср}}$, $K_i = F_{i\text{кан}} / F_{i\text{ш}}$ — коэффициент соотношения площадей каналов и шпилек ($F_{i\text{кан}}$, $F_{i\text{ш}}$ — площадь, занимаемая каналами и

шпильками в i -квадрате соответственно). Средний коэффициент соотношения площадей $K_{i\text{ср}} = S_{\text{ви}}/S_{\text{ш}}$.

Предварительная затяжка болта при сборке должна обеспечить плотность соединения и отсутствие раскрытия стыка после приложения внешней силы $F_{\text{н}}$ во время работы кристаллизатора.

Согласно работе [3], при установке шпилек в отверстие с зазором внешняя растягивающая сила полностью передается болту. От этой силы болт удлиняется на Δl_6 . На это же значение уменьшается сжатие деталей, и нагрузка на болт со стороны плиты снижается.

Согласно работе [1], внешнее усилие $F_{\text{н}}$ перераспределяется между стыком и винтом, причем одна часть внешней нагрузки дополнительно нагружает винт, а другая уменьшает затяжку стыка. Весь стык ослабляется на величину $\Delta F = (1 - \chi)F_{\text{н}}$, а каждая шпилька на $\Delta F_1 = (1 - \chi)F_1$ (χ — коэффициент основной нагрузки). Для металлических деталей без применения прокладок $\chi = 0,2 \div 0,3$.

Кроме нормальной силы $F_{\text{н}}$ на плиту действует усилие сдвига $F_{\text{с}}$ (см. рисунок), которое определяем, зная максимально допустимую силу отрыва слитка из кристаллизатора:

$$F_{\text{с}} = \frac{F_{\text{smax}}L}{2(L + L_{\text{м}})}. \quad (2)$$

Условие несдвигаемости медной и стальной плит за счет сил трения выполняется при условии

$$F'_0 = \frac{F_{\text{с}}s_{\text{с}}}{f_{\text{м}}}, \quad (3)$$

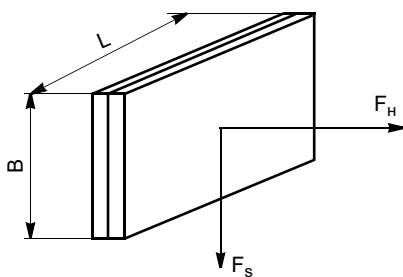
где $s_{\text{с}}$ — коэффициент запаса по сдвигу ($s_{\text{с}} = 1,2 \div 1,4$).

Первоначальная сила затяжки шпильки с учетом сдвигающей силы

$$F_0 = \frac{F'_0}{n_{\text{шп}}} + (1 - \chi)F_1; \quad (4)$$

сила затяжки при давлении воды $P = P_{\text{вmax}}$

$$F_{0\text{исп}} = \frac{S_{\text{и}}P_{\text{вmax}}(1 - \chi)}{n_{\text{шп}}}; \quad (5)$$



Основные силовые факторы, действующие на плиту

давление, стягивающее плиты во время работы кристаллизатора,

$$p_0 = \frac{F'_0}{S_{\text{ст}}};$$

момент затяжки [1]

$$T_3 = l_3 \max(F_0, F_{0\text{исп}}), \quad (6)$$

$$\text{где } l_3 = \left[\frac{d_2}{2} \text{tg}(\gamma + \rho') + \frac{f}{3} \frac{D_{\text{ш0}}^3 - d_{\text{ш0}}^3}{D_{\text{ш0}}^2 - d_{\text{ш0}}^2} \right],$$

ρ' — приведенный угол трения, равный $\text{arctg} \frac{f_{\text{м}}}{\cos(\alpha/2)}$; эквивалентное напряжение, возникающее в стержне,

$$\sigma_{\text{е}} = k_3 \frac{4 \max(F_0, F_{0\text{исп}})}{\pi d_1^2}, \quad (7)$$

$$\text{где } k_3 = \sqrt{1 + 12 \left(\frac{d_2^2 (\text{tg}^2(\gamma + \rho'))}{d_1^2} \right)}.$$

В работе [2] указывается, что если гайка изготовлена из менее прочного материала, чем болт, то, несмотря на большую площадь среза ее витков, они могут оказаться менее прочными, чем витки резьбы болта. В этом случае в выражение (7) вместо d_1 подставляет d , а в условии прочности рассматривают свойства менее прочного материала:

$$\sigma_{\text{е}} = k_3 \frac{4 \max(F_0, F_{0\text{исп}})}{\pi d^2}.$$

Условие прочности болтового соединения определяем выражением $\sigma_{\text{е}} \leq \sigma_r/s$ (s — коэффициент запаса прочности, при контроле затяжки равный 1,3—1,5, при отсутствии контроля 1,5—2,5). Примем предел прочности $\sigma_{\text{в}} = 220$ МПа, предел текучести для меди $\sigma_r = 100$ МПа. Полученный запас прочности срыва шпильки

$$s = \sigma_r/\sigma_{\text{е}}. \quad (8)$$

Произведенные расчеты подтвердили возможность применения щелевых каналов вместо цилиндрических при сохранении толщины плиты кристаллизатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелюфаст В. В. Основы проектирования машин. М.: Изд-во АГПМ, 472 с.
2. Детали машин / А. Т. Батурин, Г. М. Ицкович, Б. Б. Панич и др. М.: Машиностроение, 1968. 467 с.
3. Куклин Н. Г., Куклина Г. С. Детали машин. М.: Высшая школа, 1987. 383 с.

В. Ф. ГУБАНОВ, канд. техн. наук
Курганский государственный университет

Современный инструмент для выглаживания

При выглаживании классическим инструментом [1] высотные параметры шероховатости обработанной поверхности зависят от кинематики его движения (подачи), что накладывает определенные ограничения на производительность процесса выглаживания.

Для уменьшения высотных параметров шероховатости поверхности и возможности работы с более высокими подачами разработана конструкция выглаживателя, включающая два индентора, два винта и державку.

При помощи винта 3 индентор 1 закрепляется в державке 5, а индентор 2 закрепляется в ней при помощи винта 4 (рис. 1). При этом инденторы расположены в осевом направлении (направление продольной подачи инструмента) на расстоянии Δx относительно друг друга.

Выглаживатель работает следующим образом. Его устанавливают по оси центров токарного станка так, чтобы инденторы находились на одинаковом расстоянии относительно оси центров токарного станка, индентор 2 — выше, а индентор 1 — ниже оси центров токарного станка. При движении инструмента на рабочей подаче индентор 2 уменьшает на максимально возможную величину высотные параметры шероховатости поверхности, проходя по вершинам профиля шероховатости поверхности (что обеспечивается определенным сочетанием значений продольной подачи инструмента и величины Δx), образованной индентором 1 (рис. 2).

Теоретические значения параметров шероховатости при одинаковом радиусе инденторов (Rz — высота неровностей профиля по десяти точкам, Sm — средний шаг неровностей профиля) зависят

от радиуса инденторов R , подачи S_0 и конструкции выглаживателя:

$$Rz = R - \sqrt{R^2 \frac{S_0^2}{16}}; \quad (1)$$

$$Sm = S_0/2. \quad (2)$$

Таким образом, высотные параметры шероховатости поверхности уменьшаются по сравнению с обработкой классическим инструментом (при одних и тех же радиусах инденторов и подачах) в 4 раза!

Известно [1—3], что увеличение радиуса индентора уменьшает распределенную нагрузку на обрабатываемую поверхность, следовательно, уменьшится и микротвердость поверхностного слоя. С увеличением радиуса индентора максимальные остаточные напряжения уменьшаются, так как зависят от контактного давления. Увеличение радиуса индентора приводит к уменьшению высотных параметров шероховатости поверхности, поэтому при обработке классическими выглаживателями всегда определяют компромиссные условия обработки, чтобы обеспечить заданные значения микротвердости поверхностного слоя, остаточных напряжений и высотных параметров шероховатости выглаженной поверхности.

Разработанная конструкция инструмента позволяет легко решить эту задачу: первый индентор может быть меньшего радиуса, чем второй. Таким образом, первым индентором будут обеспечены заданные (максимальные) значения микротвердости поверхностного слоя и остаточных напряжений, а вторым — заданные значения высотных параметров шероховатости выглаженной поверхности. При этом производительность процесса обработки бу-

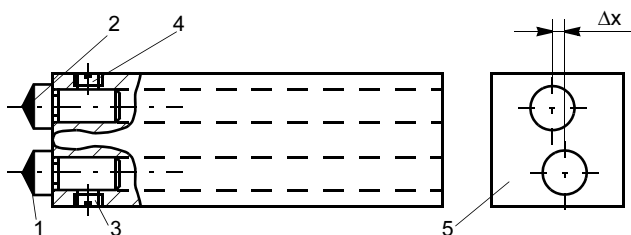


Рис. 1. Выглаживатель

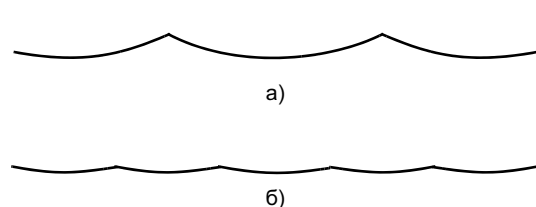


Рис. 2. Профиль шероховатости выглаженной поверхности после прохода первым (а) и вторым (б) инденторами

дет выше, чем с применением классического инструмента.

Для предварительного выбора радиусов инденторов, величины подачи и других условий обработки можно применять типовые зависимости параметров качества поверхностей от параметров режима обкатывания [4], которые характерны также и для выглаживания. После назначения режимов и условий обработки по указанным графикам требуется проведение незначительного количества экспериментов для коррекции режимов обработки, чтобы получаемые значения параметров качества поверхностного слоя выглаженных деталей для конкретного обрабатываемого материала предложенной конструкцией выглаживателя соответствовали заданным.

Рассмотренный инструмент позволяет в некоторой степени решить самую важную проблему, из-за которой выглаживание не находит широкого применения в промышленности. Суть проблемы заключается в том, что даже незначительный износ индентора приводит к ухудшению получаемых при выглаживании параметров качества поверхностного слоя деталей. Помимо этого износ индентора требует либо его замены, либо доводки, что в обоих случаях повышает технологическую себестоимость изготавливаемых деталей.

В данном случае при целесообразной величине износа первого индентора второй индентор вследствие того, что он нагружен на порядок меньше и почти не изнашивается, компенсирует возможные дефекты, которые проявятся на поверхности при износе первого индентора. И поскольку поверхность окончательно формируется в основном вторым индентором, первый можно изготавливать из более дешевого инструментального материала, чем второй,

например, использовать в качестве материала первого индентора — твердый сплав, а второго — синтетический алмаз.

Таким образом, разработанная конструкция инструмента по сравнению с классическим выглаживателем обеспечивает следующие основные преимущества:

- в 4 раза уменьшаются высотные параметры шероховатости поверхности;
- возможно получение оптимального сочетания (исходя из требуемых эксплуатационных свойств детали) значений микротвердости поверхностного слоя, остаточных напряжений и высотных параметров шероховатости выглаженной поверхности;
- возможна интенсификация процесса выглаживания (повышение производительности обработки).

Разработанная конструкция инструмента для выглаживания является простой в практической реализации, незначительно отличается по себестоимости изготовления от классической конструкции, следовательно, ее применение целесообразно на промышленных предприятиях при изготовлении ответственных деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Торбило В. М.* Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. 104 с.
2. *Папшев Д. Д.* Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
3. *Одинцов Л. Г.* Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. М.: Машиностроение, 1981. 160 с.
4. *Шнейдер Ю. Г.* Технология финишной обработки давлением: Справочник. СПб.: Политехника, 1998. 414 с.

С. М. ЛОМОВ, канд. техн. наук, О. С. ЛОМОВА, канд. техн. наук, В. В. МАКАРЕНКО, инж.
Омский государственный технический университет

Обеспечение точности размеров формы прецизионных деталей при круглом шлифовании в центрах

Основным параметром, характеризующим качество деталей, является точность обработки, которая формируется на финишных операциях технологического процесса. Около 70 % деталей обрабатывается в центрах круглошлифовальных станков. Принято считать, что обработка в центрах является точной и механические базы (центры станка и центровые отверстия) существенно не влияют на точность обработки. Однако для прецизионных дета-

лей критерием точности обработки выступает не только точность исполнения размера, но и точность формы в продольном и поперечном сечениях. Отклонение формы особенно для прецизионных деталей (золотниковых деталей компрессорных машин и т. п.) может составлять большую часть допуска на размер. Таким образом, количественная характеристика точности — погрешность — определяется главным образом отклонением формы

обрабатываемой поверхности, а уменьшение ее является эффективным способом повышения точности обработки и, как следствие, улучшения качества механизмов.

Форма деталей, обработанных в центрах станка, зависит от многих факторов, степень влияния которых различна. Наиболее существенный фактор — геометрическая точность станка, характеризующаяся точностью положения центров станка относительно друг друга и их геометрической формы. Другой фактор — исходная погрешность самой детали, и третий — действие силовых, температурных деформаций на узлы станка и деталь при ее обработке.

Таким образом, точность обработки зависит от значительного количества одновременно действующих технологических факторов, поэтому в основу исследований причин образования отклонения формы при обработке в центрах необходимо применить принцип их совместного действия. В частности, рассмотрим совместное влияние осевого колебания центра, несоосности центров, зазоров в пиноли бабки станка и шпиндельном узле при действии сил резания и тепловых деформаций узлов станка и детали. Точность размера и формы детали, обрабатываемой в центрах станка, зависит от того, сохранилась ли при смене параллельность ее оси вращения и режущей кромки шлифовального круга. При смене детали центр передней бабки остается неподвижным, а пиноль задней бабки с центром может занимать различные положения в осевом направлении из-за колебания длины детали и глубины центровых отверстий. Смещение в радиальном направлении подвижного центра обусловлено не только осевым перемещением, но и наличием зазора между пинолью и корпусом задней бабки, вызывающегося перекося центров и увели-

вающегося по мере износа корпуса и пиноли. Перечисленные причины приводят к постепенному изменению положения оси заднего центра и, как следствие, систематическому изменению положения оси вращения детали. На рисунке приведена схема образования отклонения формы продольного профиля.

При отсутствии других влияющих факторов изменение зазора в результате износа и даже упругие деформации можно было бы учесть настройкой станка, но при наличии другого фактора — колебания пиноли с центром в осевом направлении — такой настройки оказывается недостаточно. В рассматриваемом случае радиальное смещение возможно рассчитать, зная величину ожидаемых погрешностей [1]:

$$y = \frac{L_{\max}}{L_{\min}} \left[\frac{z_{\text{п}} + z_{\text{из}}}{L_{\text{сп}} - b - (T_{\text{ц}} + 2T_{\text{е}})} - \frac{z_{\text{п}} - z_{\text{из}}}{L - b} \right], \quad (1)$$

где L_{\max} , L_{\min} — соответственно максимальная и минимальная длина детали в партии; $z_{\text{п}}$, $z_{\text{из}}$ — зазоры в пиноли посадочный и износа; $T_{\text{ц}}$, $T_{\text{е}}$ — допуски на глубину центровых отверстий, L — длина пиноли с центром; b — вылет пиноли с центром.

Тогда погрешность формы продольного профиля $\Delta_{\text{ф}}$ будет равна $2Ly$.

Если рассматривать влияние только торцевого биения на точность обработки, а все прочие величины считать равными нулю, то оно не будет создавать погрешности формы при обработке. Но если торцевое биение рассматривать в сочетании хотя бы с одной влияющей величиной, например с перекосям центров, то форма наружной поверхности при обработке в центрах будет овальной, погрешность формы которой может быть рассчитана по формуле [2]

$$\Delta_{\text{ов}} = \frac{d + 0,5(D - d)\text{tg}\gamma \sin\gamma}{1 + \frac{D\text{tg}\gamma}{\delta_{\text{тб}}e}} \sin\gamma, \quad (2)$$

где d — диаметр центрального отверстия; D — диаметр обрабатываемой поверхности; $\delta_{\text{тб}}$ — торцевое биение; e — несоосность центров; γ — угол перекося осей центров.

Наличие перечисленных факторов влияет не только на образование отклонения формы в продольном сечении, но и на образование погрешности формы в поперечном сечении, т. е. деталь при вращении имеет прецессию — круговое движение вращающейся оси. Естественно, форма обработанной поверхности будет зависеть от характера прецессии оси. И если это применить к обработке деталей, имеющих прерывистую поверхность, то

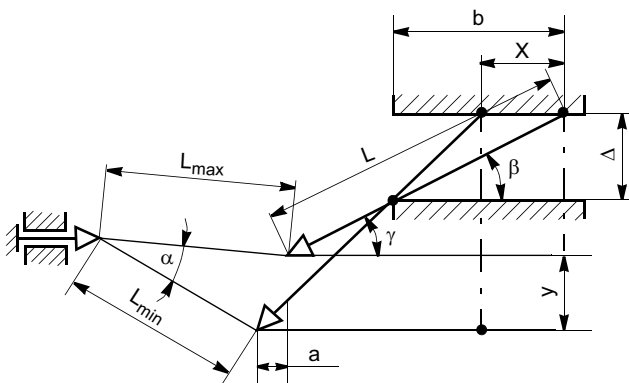


Схема образования смещения центра (x — осевые перемещения пиноли при смене детали; a — осевое перемещение центра; γ , β — угол поворота пиноли с центром; α — угол поворота оси детали; Δ — посадочный зазор пиноли в корпусе)

добавляется еще один параметр, характеризующий точность обработки — отклонение формы выступов, которые создают переменность диаметра в пределах его ширины. Текущий радиус-вектор в связи с изменением расстояния между осями вращения детали и шпинделя не остается постоянным в силу действия технологических факторов. Учитывая наличие зазоров в узлах станка, колебание упругих деформаций и сил резания, изменение радиуса-вектора за период одного оборота

$$r_i = \left[\Delta_{3.6} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{G_{3.6} \cos \zeta}{P} - f \right) + \Delta'_q \right] + \left(0,5 \Delta_{п.6} \frac{P \cos \zeta}{G_{ш} - P \sin \zeta} + \Delta''_q \right), \quad (3)$$

где $D_{3.6}$, $\Delta_{п.6}$ — радиальное смещение задней и передней бабок от зазоров соответственно; G , $G_{ш}$ — масса бабок и шпинделя соответственно; P — суммарная сила резания; Δ'_q , Δ''_q — упругое смещение бабок и шпинделя соответственно; f — угол трения; ζ — угол между результирующей силой и горизонталью.

Приведенная математическая зависимость расстояния от центра вращения детали до точки касания с режущей поверхностью шлифовального круга и угла поворота детали при обработке с выхаживанием позволяет рассчитать изменение радиуса

вектора (без учета действия сил резания). Уравнение кривой в полярной системе координат, описывающей форму наружной поверхности при выхаживании, имеет вид

$$r_i = R - \Delta + \frac{\Delta}{2\pi} \varphi \quad \text{при } 0 < \varphi \leq \pi;$$

$$r_i = R - \frac{\Delta}{2\pi} \varphi \quad \text{при } \pi < \varphi \leq 2\pi, \quad (4)$$

где R — радиус детали до ее вращения; Δ — подача на один оборот детали; φ — угол поворота детали в центрах.

Экспериментальная проверка показала хорошее совпадение с расчетами.

Таким образом, разработанная теория образования отклонения формы реальных поверхностей при обработке в центрах позволяет разработать способы снижения отклонения формы за счет ограничения и нормирования отклонения от соосности центров станка и центровых отверстий, действия колебания сил резания, износа и зазоров в базовых узлах станка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломов С. М. Формирование цилиндрической поверхности детали при ее шлифовании в центрах. М., 1992. 58 с.
2. Ломов С. М. Расчет и проектирование технологических приспособлений для деталей типа тел вращения: Учебное пособие. Омск: ОмГТУ, 1997.

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

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

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

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

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

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

В. К. СТАРКОВ, д-р техн. наук, **С. А. РЯБЦЕВ**, канд. техн. наук
(МГТУ "Станкин"),

В. А. ПОКЛАД, канд. техн. наук, **В. С. НОВИКОВ**, канд. техн. наук
(ФГУП "ММПШ "Салют"),

М. КАЙЗЕР, д-р-инж.
(фирма *Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge*, Германия),

С. В. КОСТРОВ, инж.
(ОАО "Волжский абразивный завод")

Сравнительный анализ работоспособности высокопористых эльборовых и корундовых кругов при профильном зубошлифовании

В производственной практике бездефектного шлифования зубчатых колес обычно используют высокопористые круги на основе электрокорунда белого. За рубежом для этих целей все чаще применяют шлифовальные круги из кубического нитрида бора (эльбора) нормальных структур. В МГТУ "Станкин" разработаны специальные составы высокопористых эльборовых кругов, которые показали хорошие результаты при шлифовании ответственных деталей из сталей, жаропрочных никелевых и титановых сплавов [1—3]. При обработке сталей все более широкое распространение получают шлифовальные круги на основе модификации корунда — микрокристаллического корунда по специальной, так называемой SG-технологии.

Таким образом, при разработке технологии шлифования зубчатых колес имеются альтернативные варианты назначения характеристики шлифовального круга, оптимальность выбора которого обусловлена технологическими и эксплуатационными показателями.

Микрокристаллический корунд, изготовленный по SG-технологии, в 20 раз дороже электрокорунда белого, а стоимость кубического нитрида бора почти в 3000 раз превышает стоимость абразивных зерен из микрокристаллического корунда. Наиболее распространенная область использования всех этих абразивных материалов одна и та же — шлифование сталей. Возникает вопрос: какие должны быть условия шлифования, чтобы повышенные расходы на инструмент из микрокристаллического корунда и особенно из эльбора были технологически и экономически оправданы. Трудно ожидать, что и подтверждается на практике, чтобы стойкость эльборовых шлифовальных кругов при обработке сталей была на три порядка выше, чем у корундового инструмента.

Для снижения стоимости шлифовальные круги

на основе эльбора и микрокристаллического корунда изготавливают с содержанием зерна до 25 % объема инструмента, но цена на них остается высокой. Опыт применения этих кругов показал, что их стоимость коррелирована с их эксплуатационными свойствами. Более низкая стоимость инструмента из микрокристаллического корунда в сравнении с эльбором и лучшие режущие свойства в сравнении с зерном электрокорунда белого дают основание предположить, что шлифовальные круги на основе микрокристаллического корунда при определенных условиях могут стать альтернативой эльборовым кругам.

В работе [4] выполнен сравнительный анализ шлифовальных кругов из различных абразивов с различными характеристиками: из электрокорунда белого А80 Z8 В, микрокристаллического корунда (синтеркорунда) SG 80 UB и кубического нитрида бора В181 С100 V и В213 С100 В. Испытания проводили для проверки эффективности шлифования с охлаждением маслом и маслом вместе с присадкой, в составе которой находилась сера. Оказалось, что состав смазочно-охлаждающей жидкости влияет не только на показатели процесса шлифования данными кругами, но и на возможность вообще шлифовать кругом определенной характеристики.

Условия плоского шлифования стали S6-5-2 (60 HRC) были напряженными: скорость круга 80 м/с, глубина резания 2 мм и продольная скорость стола 1,5 м/мин, что в совокупности обеспечило очень высокую производительность $Q_w = 50 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$. При этих режимах шлифования с охлаждением маслом кругом из кубического нитрида бора на керамической связке с характеристикой В181 С100 V возникли большие усилия — 374 Н/мм и слой КНБ разрушился. Остальные круги на бакелитовой связке обеспечили съем материала при охлаждении маслом. При охлаждении маслом с

Таблица 1

Характеристика круга	Сила резания, Н/мм		Радиальный износ круга, мкм	Ra, мкм
	P_z	P_y		
A80 Z 8 B	40	130	42	0,30
SG 80 UB	40	110	31	0,35
B213 C100 B	37	1120	52	0,40
B181 C100 V	25	70	60	0,60

сернистой присадкой круги из КНБ и электрокорунда на бакелитовой связке улучшили показатели процесса шлифования на 14—20 %, а при обработке кругом из микрокристаллического корунда показатели процесса сохранились на прежнем уровне.

Наиболее важный результат, однако, заключается в сравнении режущих свойств всех испытанных кругов из трех различных абразивов в одинаковых высокопроизводительных условиях шлифования.

В табл. 1 приведены значения тангенциальной P_z и нормальной P_y составляющих силы резания, радиального износа и параметра шероховатости обработанной поверхности, полученные пересчетом из графиков работы [4] при шлифовании после предварительного удаления $2,5 \cdot 10^4$ мм³/мм материала. Рассматривая представленные результаты, невозможно выделить характеристику шлифовального круга, которая имела бы неоспоримые преимущества одновременно в динамике процесса, изнашивании инструмента и качестве обработки. Это удивительное заключение, учитывая огромную разницу в стоимости использованных в кругах абразивных материалов.

Проанализировав экспериментальный материал, приведенный в работе [4], можно сделать вывод, что для каждого из абразивных материалов — корунда, SG и кубического нитрида бора должна быть определена своя рациональная область использования. Эта область зависит от режущих свойств абразива во взаимосвязи с характеристикой шлифовального круга (зернистостью, твердостью, структурой, связкой) и условиями обработки (правкой, режимом шлифования, составом охлаждения).

Ниже приведены результаты лабораторных исследований и производственных испытаний высокопористых кругов на керамической связке, изготовленных на основе электрокорунда белого, микрокристаллического корунда и эльбора с целью установления рациональных областей их применения.

Лабораторные исследования. Для прямого сопоставления режущих свойств эльбора ЛКВ, микрокристаллического корунда SG/25A и электрокорунда белого 25A на их основе были изготовлены высокопористые круги прямого профиля с размерами $70 \times 12 \times 20 \times 10$. Все круги имели структуру 12,

один и тот же состав керамической связки и обжигались при одинаковом температурном режиме. Количество абразивных зерен определяли в соответствии с принятыми составами для конкретных абразивных материалов. Расчетные характеристики кругов составили: ЛКВ 160/125 C1 12 K, SG80/25A C1 12 K и 25A 12 C1 12 K с близкой зернистостью абразива и одинаковой твердостью.

Все круги были испытаны в одинаковых технологических условиях при плоском шлифовании стали 100Cr6 с твердостью 60 HRC на станке "Helitronic Power" фирмы Walter (Германия). Для охлаждения зоны резания использовали масло Shell Macron 2429S-8.

Шлифовальные круги правили алмазным обтачивающим роликом NC с радиусом $R = 0,19$ мм производства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge (Германия) перед сменой условий шлифования. Режим правки был принят постоянным со следующими параметрами: отношение скоростей алмазного ролика и круга $q = 0,9$ (попутная правка); коэффициент перекрытия $U_d = 4$; глубина правки за проход ролика $a_d = 0,003$ мм; число проходов $N_d = 25$.

Каждая серия испытаний по выбранной схеме шлифования состояла из нескольких повторяющихся циклов: пять циклов для маятникового шлифования с удельным съемом металла по $V'_w = 100$ мм³/мм за цикл и три цикла для глубинного шлифования с $V'_w = 150$ мм³/мм за цикл. Суммарный удельный объем металла, отнесенный к высоте круга и сошлифованный при маятниковой схеме, составил 500 мм³/мм, а при глубинной — 450 мм³/мм.

В ходе обработки на станке измеряли нормальную P_y и тангенциальную P_z составляющие силы шлифования, а после шлифования — параметр шероховатости обработанной поверхности и величину радиального износа круга. Для измерения составляющих силы шлифования применяли встроенное динамометрическое устройство фирмы Kistler Instrumente (Германия). Параметр шероховатости обработанной поверхности заготовки контролировали прибором серии MarSurf модели PGK 120 фирмы Maht (Германия). Износ шлифовальных кругов после обработки определяли посредством копирования профиля круга на тонкую металлическую пластинку с последующим сканированием профиля при помощи профилометра серии MarSurf модели PCV 200.

При попутной схеме маятникового шлифования испытания проводили со скоростью круга 30 м/с с размерами обрабатываемой поверхности образца 6×150 мм, глубиной резания 0,01 мм и скоростью перемещения стола 6000 мм/мин. Производительность по съему материала составила $Q_w = 1$ мм³/(мм · с).

Таблица 2

Характеристика круга	Δ и, мкм	R_a , мкм	R_z , мкм
ЛКВ 160/125 C1 12 K	2	0,31	2,31
SG 80/25A 12 C1 12 K	2	0,40	3,28
25A 12 C1 12 K	6	0,55	3,79

Результаты измерения нормальной P_y , тангенциальной P_z составляющих силы шлифования и их отношения P_z/P_y от объема удаленного металла (соответственно времени шлифования) приведены на рис. 1. Значения P_y и P_z для эльборового круга и круга из микрокристаллического корунда практически близки друг к другу с разницей 14—15 % для их средних величин, а для круга из электрокорунда белого средние значения этих составляющих силы резания оказались в 2,2—2,3 раза больше, чем при шлифовании эльборовым кругом. Характер изменения отношения P_z/P_y менее стабилен во времени обработки для всех трех исследованных кругов, но среднее значение P_z/P_y для электрокорундового круга меньше, чем для кругов с другими характеристиками.

Результаты измерения размерного износа круга ΔI и параметра шероховатости обработанной поверхности образца после маятникового шлифования и удаления $500 \text{ мм}^3/\text{мм}$ металла приведены в табл. 2.

В условиях маятникового шлифования высокопористыми кругами из эльбора и смеси зерен SG/25A получены примерно одинаковые результаты динамики процесса и размерного износа инструмента. Параметр шероховатости поверхности, обработанной эльборовым кругом, оказался лучше, чем после шлифования кругом из микрокристаллического корунда.

Несмотря на то, что зернистость 12 электрокорундового круга более соответствует условиям чистового шлифования, чем зернистость 16 инструмента из других абразивов, при его применении получили большую высоту микронеровностей на шлифованной поверхности. Размерный износ высокопористого круга из электрокорунда белого был в 3 раза больше.

Во всех случаях маятникового шлифования различными кругами прижогов и других дефектов не наблюдалось.

При схеме глубинного шлифования глубину резания увеличили до 0,5 мм, а скорость стола уменьшили до 6 мм/мин. С такой комбинацией параметров режима обработки производительность по съему материала составила $0,5 \text{ мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$ или в 2 раза меньше, чем при маятниковом шлифовании.

Изменились условия обработки и соответственно реакция инструментов. Высокопористые круги из электрокорунда белого и микрокристаллического корунда исследованных характеристик оказались непригодными для принятых условий глубинного шлифования. Нормальная составляющая силы резания данными кругами возросла почти в 3 раза, а тангенциальная составляющая до 2,5—3,2 раз (для круга из зерна 25A больше), в сравнении с обработкой эльборовым кругом. Эльборовый круг имел размерный износ после удаления $450 \text{ мм}^3/\text{мм}$ металла в 4—4,5 раз меньше, чем корундовые круги после удаления $150 \text{ мм}^3/\text{мм}$. При обработке этими кругами сразу же появлялся прижог на шлифуемой поверхности и дальнейшие испытания не имели смысла.

В процессе глубинного шлифования высокопористым эльборовым кругом зафиксированы стабильные значения P_z — 1,3 Н и небольшое увеличение составляющей P_y — от 28 до 30 Н. Улучшилась шероховатость обработанной поверхности: по величине R_a с 0,31 до 0,23 мкм, по R_z — с 2,31 до 1,83 мкм.

Производственные испытания кругов из различных абразивных материалов проводили при профильном шлифовании зубчатых колес на профилешлифовальном станке модели Р600G. Было изготовлено четыре шлифовальных круга прямого профиля с размерами $100 \times 20 \times 51$ — корундовые круги с характеристиками 25A 16 M1 12 K, SG/25A 16 CM2 12 K и эльборовые круги с характеристиками ЛКВ 160/125 CM2 12 K и ЛКВ 100/80 CM1 8 K.

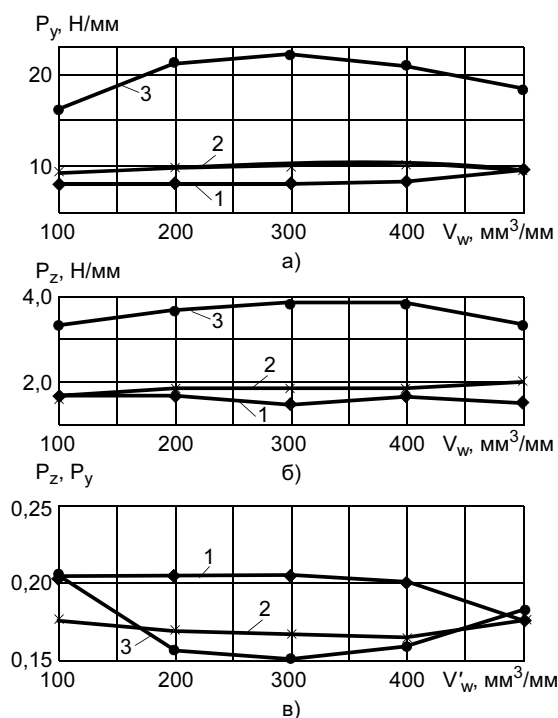


Рис. 1. Зависимости нормальной (а), тангенциальной (б) составляющих силы маятникового шлифования и их отношения (в) от удельного съема материала высокопористыми кругами: 1 — ЛКВ 160/125 C1 12 K2; 2 — SG80/25 A12 C1 12 K2; 3 — 25A 12 C1 12 K

Таблица 3

Характеристики круга	Скорость круга, м/с	Глубина правки, мм	Время правки, мин
ЛКВ 100/80 CM1 8 К	15	0,05	133
ЛКВ 160/125 CM2 12 К	15	0,10	67
SG/25A 16 CM2 12 К	30	0,10	35
25A 16 M1 12 К	30	0,20	18

На первом этапе проверяли возможность использования эльборовых кругов и круга из микрокристаллического корунда на операции профилирования методом глубинного шлифования цилиндрических зубчатых колес. Колеса из термоупрочненной стали 16ХЗНВФМБ-Ш (29—31 HRC) имели модуль 3 мм, $z = 17$, $b = 17$ и $\alpha = 20^\circ$.

Круги на фасонную рабочую поверхность под $m = 3$ мм профилировали алмазным обкатывающим роликом с радиусом 0,6 мм производства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge. Режим правки выбирали в зависимости от характеристики круга (табл. 3) при постоянных значениях отношения скорости ролика к скорости круга, равным 0,8, и коэффициента перекрытия 10.

Для профилирования впадины между соседними зубьями с модулем 3 мм шлифовальному кругу необходимо внедряться в заготовку на глубину 6,75 мм. Эльборовые круги и круги из микрокристаллического корунда в этих условиях глубинного шлифования оказались неработоспособными: скачкообразный рост нагрузки, резкий звук, сноп искр, интенсивные прижоги на обрабатываемых поверхностях зубьев. Спрофилировать впадину удалось только многопроходным шлифованием с глубиной хода 0,1 мм высокопористыми кругами из эльбора и SG/25A. Эльборовый круг структуры 8 не пригоден для профилирования зубчатых колес даже на мягких режимах шлифования: после девяти проходов с глубиной 0,1 мм и продольной скоростью 3000 мм/мин он имел катастрофический размерный износ с уменьшением своего диаметра на 10,5 %. В табл. 4 помимо параметров режима шлифования (глубины t , скорости продольной подачи $S_{пр}$) приведены значения потребляемой мощности N , погрешности обработки профиля зуба $f_{H\alpha}$, F_p , параметр шероховатости Ra обработанной поверхности и машинное время τ обработки одной впадины.

На следующем этапе испытаний круги проверя-

ли на работоспособность при чистовом шлифовании тех же зубчатых колес, что обрабатывали методом глубинного шлифования. Зубчатые колеса прошли цементацию и закалку на твердость 64 HRC и имели припуск на обработку 0,23 мм на сторону. Чистовым шлифованием указанный припуск удаляли за один двойной ход круга с глубиной резания соответственно 0,18 и 0,05 мм. При постоянных значениях глубины резания продольную скорость перемещения круга подбирали в соответствии с технологическими возможностями каждого из четырех испытанных шлифовальных кругов. Критериями ограничения продольной скорости перемещения круга были появление прижогов на обработанных поверхностях зубьев и повышенный размерный износ круга.

Экспериментально установленные диапазоны возможного изменения продольной скорости круга при заданной глубине прохода, диапазона мощности процесса, шероховатости обработанной поверхности и точности обработки профиля зуба приведены в табл. 5. Для диапазонов исследованных характеристик шлифования разработаны математические модели связи с параметрами режима обработки, а их степень влияния выражена через коэффициенты парной корреляции. На рис. 2 приведены расчетные зависимости изменения потребляе-

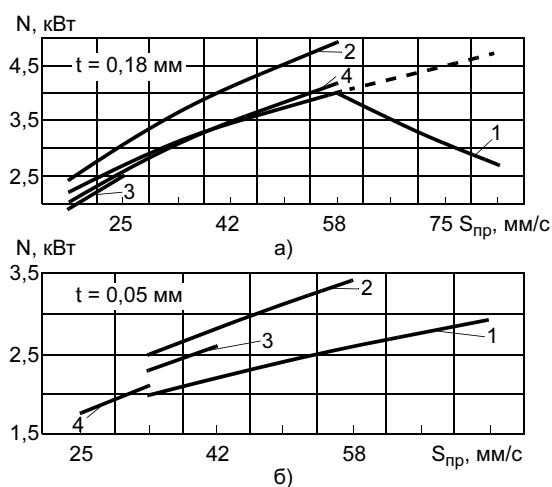


Рис. 2. Зависимость потребляемой мощности от глубины резания при t , равном 0,18 (а) и 0,05 (б) мм и скорости продольной подачи круга при чистовом профильном шлифовании зубчатого колеса для кругов: 1 — ЛКВ 100/80 CM1 8 К; 2 — ЛКВ 160/125 CM2 12 К; 3 — SG 80/25A 16 CM2 12 К; 4 — A99 100 I 12V

Таблица 4

Характеристика круга	Число проходов	t , мм	$S_{пр}$, мм/мин	N , кВт	$f_{H\alpha}$, мкм	F_p , мкм	Ra , мкм	τ , мин
25A 16 M1 12 К	3	3,30—1,50	200	$2,25 \pm 20 \%$	23,6	10,6	1,23	16
	6	1,99—0,75	400	$1,65 \pm 10 \%$	21,6	12,8	1,80	18
SG/25A 16 CM2 12 К	67	0,1	3000	$2,25 \pm 20 \%$	22,1	4,4	1,30	41
ЛКВ 160/125 CM2 12 К	67	0,1	3000	$1,69 \pm 20 \%$	26,5	3,0	0,73	41
	67	0,1	6000	$2,7 \pm 25 \%$	10,9	4,6	1,10	27

Таблица 5

Характеристика шлифовального круга	Диапазон исследованных параметров процесса					Математическая модель связи	Степень влияния	
	Режим обработки		Выходная характеристика				t	S
	t, мм	S, мм/с	N, кВт	Ra, мкм	Δ, мкм			
ЛКВ 100/80 CM1 8 К	0,18 0,05	20,0—83,3 33,3—50,0	2,4—4,2 1,8—2,4	— 0,87—1,0	— 9,9—22,4	lnN = 0,34 lnt + 0,468 lnS - 1,851 lnRa = 0,144 lnS - 1,225 lnΔ = 0,478 lnS - 1,202	0,730 — —	0,583 0,696 0,493
ЛКВ 160/125 CM2 12 К	0,18 0,05	20,0—58,3 33,3—41,7	2,7—5,1 2,55—2,85	— 0,78—0,92	— 11,7—26,0	lnN = 0,287 lnt + 0,558 lnS - 2,467 lnRa = 0,27 lnS - 2,272 lnΔ = 2,311 lnS - 14,958	0,593 — —	0,731 0,981 0,921
SG 80/25A 16 CM2 12 К	0,18 0,05	13,3—20,0 25,0—33,3	1,8—2,1 1,5—2,7	— 0,75—0,89	— 7,0—8,0	lnN = 0,280 lnt + 0,617 lnS - 3,107 lnRa = 0,027 lnS - 0,417 lnΔ = 0,566 lnS - 2,144	-0,164 — —	0,512 0,565 0,765
A99 100 I 12 V (25A 12 M2 12 К)	0,18 0,05	20,0—58,3 33,3—41,7	2,25—4,2 2,4—2,7	— 0,81—0,90	— 10,0—16,7	lnN = 0,218 lnt + 0,562 lnS - 2,783 lnRa = 0,105 lnS - 0,974 lnΔ = 0,930 lnS - 4,505	0,445 — —	0,779 0,759 0,995

мой мощности на каждом проходе круга при $t = 0,18$ и $0,05$ мм от скорости продольного перемещения круга в экспериментально установленном диапазоне ее изменения. Для эльборового круга нормальной структуры при шлифовании с глубиной $0,18$ мм бездефектный съем металла продолжается до скорости $83,3$ м/с (5000 мм/мин), но при интенсивном изнашивании инструмента.

Изменение параметра шероховатости обработанной поверхности Ra и точности профиля зуба после чистового прохода с глубиной врезания $0,05$ мм приведена на рис. 3.

При шлифовании корундовыми высокопористыми кругами была проверена схема чистового шлифования с разбивкой припуска на пять проходов: четыре прохода с глубиной $0,055$ мм и пятый — $0,01$ мм. Все проходы выполняли с продольной скоростью 2500 мм/мин. При сравнении двух шлифовальных кругов лучшие результаты показал высокопористый круг на основе микрокристаллического корунда SG с характеристикой SG/25A 16 CM2 12 К.

В отличие от круга 25A 12 M2 12 К круг на основе SG обеспечил лучшие показатели: по мощности шлифования с глубиной $0,055$ мм (соответственно $2,25$ и $2,4$ кВт); параметру шероховатости обработанной поверхности Ra ($0,81$ и $0,85$ мкм) и погрешности угла впадины ($10,55$ и 16 мкм).

При контроле на наличие прижогов и микротрещин после обработки кругом SG прижогов на обработанных поверхностях зубьев не обнаружено, а микротрещины зафиксированы на дне четырех впадин из девяти обработанных. После шлифования кругом из электрокорунда белого зафиксированы прижоги по кромке и микротрещины на дне впадин всех обработанных зубьев. Для завершающего этапа производственных испытаний были изготовлены два шлифовальных круга с размерами $350 \times 25 \times 127$ и характеристиками ЛКВ

125/100 M2 12 К и 99SA 80 J 9 V. При изготовлении кругов был учтен опыт предшествующих испытаний, поэтому размеры и характеристики высокопористого эльборового круга и круга из микрокристаллического корунда лучшим образом соответствуют профильному шлифованию зубчатых колес из высоколегированных закаленных сталей.

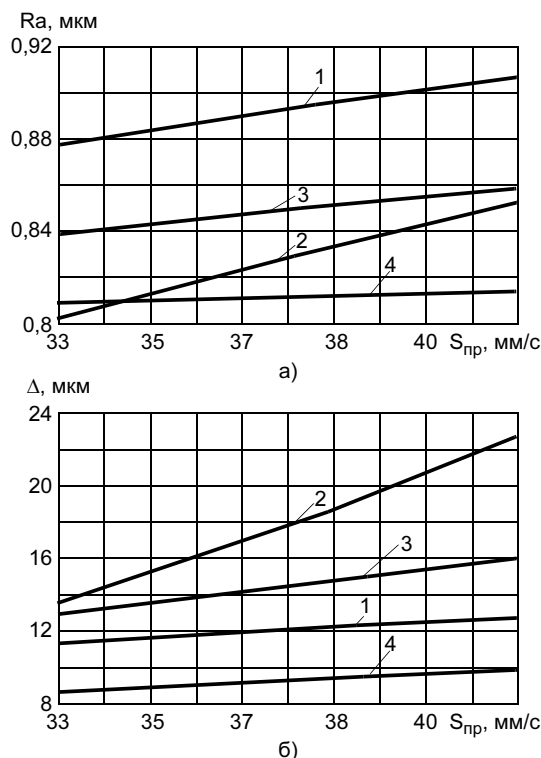


Рис 3. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности (а) и погрешности профиля зуба (б) от скорости продольной подачи круга после чистового прохода при профильном шлифовании зубчатого колеса: 1 — ЛКВ 100/80 CM1 8 К; 2 — ЛКВ 160/125 CM2 12 К; 3 — SG 80/25A 16 CM2 12 К; 4 — A99 100 I 12V

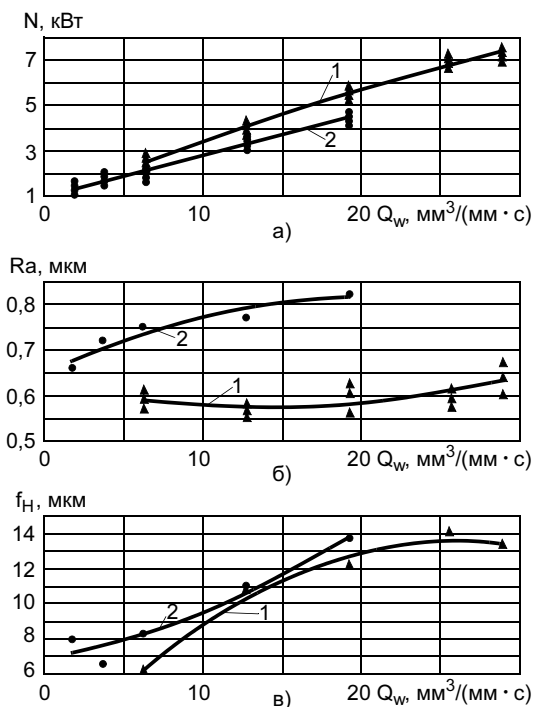


Рис. 4. Влияние удельной производительности по съему материала на потребляемую мощность (а), параметр шероховатости (б) и точность обработки (в) при шлифовании высокопористым кругом (1) и кругом из микрокристаллического корунда (2)

Данными кругами на профилешлифовальном станке P600G фирмы Gleason-Pfauter (США—Германия) обрабатывали зубчатые колеса с параметрами $m = 4$ мм, $z = 21$, $b = 30$ мм, $\alpha = 20^\circ$. Колеса из стали 16ХЗНВФМБ-Ш были цементованы и закалены до твердости 60 HRC. При скорости круга 30 м/с припуск на обработку удаляли за один проход по схеме попутного профильного шлифования с радиальной подачей на врезание 0,385 мм с охлаждением. Шлифовальные круги правили алмазным роликом NC 80 с радиусом 0,5 мм фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge с глубиной врезания 0,01 мм, скоростью перемещения 60 мм/мин при отношении окружных скоростей вращения ролика и круга 0,8.

При шлифовании продольная скорость круга изменялась начиная от 1000 мм/мин, и ее пре-

дельная величина достигала 4500 мм/мин ($Q_w = 28,9$ мм³/(м·с)) для высокопористого эльборового круга и 3000 мм/мин ($Q_w = 19,3$ мм³/(м·с)) для круга из микрокристаллического корунда. При более высоких скоростях на обрабатываемых поверхностях зубьев появлялись видимые прижоги.

Результаты измерения потребляемой мощности, шероховатости обработанной поверхности и точности обработки приведены на графиках (рис. 4).

В одинаковых условиях профильного шлифования цементованных и закаленных зубчатых колес из высоколегированных сталей высокопористый эльборовый круг обеспечил производительность в 1,5 раза выше, чем круг из микрокристаллического корунда при очень высокой скорости съема материала. Достигнутый уровень производительности шлифования высокопористым эльборовым кругом превысил в 2,4 раза скорость съема в аналогичных условиях обработки высокопористым кругом из электрокорунда белого. Если к этому добавить, что высокая производительность профильного шлифования зубчатых колес сочетается с отсутствием дефектов на обработанных поверхностях с возможностью обработки впадины между соседними зубьями по всему периметру, то становится очевиден большой потенциал высокопористого эльборового инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старков В. К., Рябцев С. А., Полканов Е. Г. Разработка и применение высокопористых шлифовальных кругов из кубического нитрида бора // Технология машиностроения. 2004. № 4. С. 26—32.
2. Профильное шлифование высокопористым эльборовым кругом зубчатых колес / М. Кайзер, Д. Хессель, В. К. Старков и др. // Вестник машиностроения. 2006. № 3. С. 45—51.
3. Производственные испытания высокопористого эльборового круга при профильном шлифовании зубчатых колес / В. А. Поклад, В. С. Новиков, Ю. И. Жуков и др. // Технология машиностроения. 2006. № 5. С. 27—31.
4. Minke E. Auswirkung der Additivierung eines Schleiföls auf Prozess- und Ergebnisgrößen beim Schleifen von Schnellarbeitsstahl // 61 Ausgabe. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen. Essen: Vulkan-Verlag, 2004. S. 49—64.

Г. В. ЧИРКОВ, инж.

Сарапульский филиал Ижевского ГТУ

Влияние импрегнирования шлифовального круга на качество обработки

Известно, что около 80 % энергии, затрачиваемой на шлифование, обычно переходит в теплоту. Значительная ее часть отводится в стружку, оставшаяся — в обрабатываемую деталь, абразивный

инструмент и окружающую среду. Тепловой процесс является определяющим фактором при формировании поверхностного слоя шлифуемой детали. Высокая мгновенная температура в зоне реза-

ния приводит к изменению структуры (разложению мартенсита) поверхностного слоя детали, появлению тепловых деформаций, возникновению остаточных напряжений, образованию прижогов и трещин. Последнее характерно в основном для закаленных деталей, имеющих высокую твердость и прочность, а также для деталей из металлов с низкой теплопроводностью.

Устранить эти недостатки можно путем уменьшения количества теплоты, образующейся при шлифовании, или путем ее рационального перераспределения в зоне контакта шлифовального круга и обрабатываемой детали благодаря правильному подбору системы абразивное зерно—связка—импрегнатор—СОЖ—обрабатываемая деталь.

В Сарапульском филиале Ижевского ГТУ проведены комплексные исследования влияния импрегнирования шлифовального круга на качество обработки. Технология изготовления абразивного инструмента, импрегнированного частицами металла (в данном случае — меди), заключается в следующем. Из сыпучей абразивной массы методом прессования получают жесткое высокопрочное тело требуемой формы с заданными свойствами. Абразивную массу готовят путем смешивания компонентов связки, абразивных зерен, на которые предварительно напыляют ионы металла, и клеящего вещества. При этом металлические частицы внедряются в формовочную массу. В процессе прессования под действием электромагнитного поля абразивные зерна образуют определенным образом ориентированные цепочки.

Для придания импрегнированному кругу (ИК) высокой прочности его подвергают после прессования термической обработке. Заданная точность формы и размеров обеспечивается механической обработкой.

Влияние тепловых процессов на качество обработанной поверхности исследовали на образцах из стали 45 (40—45 HRC) при шлифовании кругами диаметром 500 мм: стандартным марки 25A25CM2 K и ИК из такого же абразива (импрегнирование осуществлялось частицами медно-графитового сплава на установке УВНР-450Э).

Частота вращения шпинделя 283 об/мин, глубина шлифования 0,2 мм, параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,63$ мкм. Коэффициент теплопроводности для стали 45 принят равным $0,1 \text{ см}^2/\text{с}$, для ИК — $0,06 \text{ см}^2/\text{с}$ (при условии, что абразивные зерна занимают 75 % объема круга и их цепочки не сплошные). При обработке использовали внезонный способ охлаждения очистки шлифовальных кругов.

Для определения доли теплоты, переходящей в ИК и деталь, анализировали температурное поле, возникающее при плоском шлифовании детали, не прогреваемой на всю глубину за один рабочий ход. Полученные на основе результатов анализа расчетные формулы имеют вид

$$a = \frac{\lambda}{1,25\lambda_{\text{ИК}} \left(\sqrt{\frac{a}{hv_{\text{ИК}}}} + 1 \right) K};$$

$$\alpha_{\text{ИК}} = \frac{\lambda_{\text{ИК}}}{1,25\lambda \left(\sqrt{\frac{a_{\text{ИК}}}{hs}} + 1 \right) K},$$

где α , $\alpha_{\text{ИК}}$ — доли теплоты, отводимой в деталь и ИК соответственно; λ , $\lambda_{\text{ИК}}$ — коэффициенты теплопроводности детали и ИК соответственно; a , $a_{\text{ИК}}$ — коэффициенты температуропроводности детали и ИК соответственно; h — средний радиус площадки контакта абразивного зерна с деталью; $v_{\text{ИК}}$ — скорость шлифования; s — подача; K — коэффициент, учитывающий разновысотность абразивных зерен на рабочей поверхности круга.

Для рассматриваемого случая $\alpha \approx 0,7$; $\alpha_{\text{ИК}} = 0,3$, т. е. количество теплоты, поступающей в деталь и ИК, составляет соответственно 70 и 30 %.

После шлифования ИК микротвердость образцов снизилась с 8000 до 5000 МПа. На глубине 30 мкм микротвердость немного повысилась. Общая величина зоны распространения остаточных напряжений на поверхности образцов, шлифованных ИК, уменьшилась в 2 раза, причем в наибольшей степени сократилась зона распространения растягивающих напряжений. Микронапряжения в слое толщиной до 20—25 мкм при шлифовании стандартным кругом возросли в 10 раз, а при шлифовании ИК снизились в 6 раз. Мартенситная микроструктура стали сохранилась.

Исследования показали, что чем больше теплоты отводится из зоны резания в ИК, тем лучше качественные и эксплуатационные характеристики поверхностного слоя обработанной детали.

На основе результатов проведенных исследований разработана технология финишной абразивной обработки шеек коленчатых валов с одновременным нанесением слоя атомарной меди толщиной 1—3 мкм на шлифованную поверхность. Технология позволяет повысить качество обработки, благодаря чему ускоряется процесс приработки двигателей и сокращается число их ремонтов.

А. В. МЕДАРЬ, канд. техн. наук
НПО "Техномаш"

Средства технологического оснащения сборочного производства

Составная часть технологического проектирования (этап технологического синтеза) — проектирование средств технологического оснащения (СТО), являющихся одним из основных компонентов технологической системы сборочного производства, непосредственно влияет на формирование количественных характеристик качества изделий. СТО как совокупность орудий производства для осуществления технологического процесса в общем случае включают технологическое оборудование и технологическую оснастку, последняя, в свою очередь, включает технологические приспособления и инструмент.

Работы по созданию нестандартных СТО сборочного производства изделий специального машиностроения направлены на обеспечение повышенных требований к действительным значениям выходных параметров точности (ВПТ) создаваемых и перспективных машин, сокращение сроков подготовки и освоения их производства. Круг задач, решаемых в процессе создания нестандартных СТО, чрезвычайно широк и охватывает вопросы от обеспечения элементарной собираемости и контроля до сборки и контроля геометрических параметров и масс-инерционных характеристик изделий сложной формы с повышенными требованиями к ВПТ, от простой проверки на функционирование до оперативной диагностики и испытаний изделий в условиях, приближенных к эксплуатационным; от элементарного определения массы до автоматизированного контроля массовых и инерционных характеристик изделий, совмещенного с

операциями транспортировки и сборки [1—4].

В общем случае номенклатура показателей технического уровня СТО должна характеризовать наиболее существенные их свойства: совершенство (производительность, надежность, точность, энергопотребление, материалоемкость и т. п.); условия, необходимые для функционирования; сопротивляемость воздействию внешней среды и нежелательное воздействие на окружающую среду и др. При этом номенклатура основных показателей не должна превышать четырех, шести, а для некоторых видов оборудования сравнение может быть проведено по одному показателю (например обеспечиваемые ВПТ изделия).

Для рассматриваемых СТО в зависимости от их вида основными показателями технического уровня являются показатели назначения (производительность, точность сборки и контроля, быстродействие, степень имитации эксплуатационных условий, массогабаритные характеристики обслуживаемых изделий и др.); показатели надежности и долговечности (наработка на отказ, ресурс, срок службы); показатели энергоемкости (энергопотребления) и материалоемкости; эксплуатационные показатели (трудоемкость обслуживания, ремонтпригодность, срок сохраняемости основных показателей и др.); показатели безопасности. В качестве дополнительных могут быть использованы показатели уровня автоматизации и эргономические, а также показатели уровня стандартизации и др. В некоторых случаях целесообразно переходить к удельным, безразмерным

или относительным показателям, так как они позволяют обобщать данные независимо от абсолютных значений параметров СТО. Например, известно, что для стабильного функционирования в автоматизированном режиме точность СТО должна иметь 30—50 %-ный запас от допуска на обеспечиваемый параметр. Тогда показатель, равный отношению достигаемой с помощью СТО точности по какому-либо из параметров изделий к требуемой точности изделия по этому параметру, характеризует стабильность работы автоматизированных СТО. Обобщенные значения основных показателей технического уровня СТО сборочного производства изделий специального машиностроения приведены в табл. 1. По аналогии с принципом непрерывности формирования качества изделий машиностроения технический уровень как относительная характеристика качества СТО закладывается в процессе проектирования, формируется в процессе производства и поддерживается в сфере эксплуатации СТО. При этом, если все меры по обеспечению качества принять за 100 %, то 75 % из них придется на поиск конструктивно-технологических решений, проектирование, отработку макетного и доводочного образцов СТО. В связи с этим для обеспечения высокого технического уровня СТО необходимо эффективное выполнение следующих этапов работ: научно-исследовательская работа, направленная на поиск, демонстрацию и подтверждение рациональной концепции СТО; проектирование СТО в соответствии с техническими решениями и

Таблица 1

Средство технологического оснащения	Обеспечиваемый параметр	Существующий уровень	Перспективный уровень
Стенды, стапели, монтажно-стыковочное оборудование общей и агрегатной сборки	Непрямолинейность базовой продольной оси, угловая минута	3,5—5,5	2,0—4,0
	Неперпендикулярность базовых стыковочных поверхностей, угловая минута	2,0—3,0	1,0—2,0
	Закрутка базовых осей стыковочных поверхностей сборочных единиц, угловая минута	20,0—40,0	15,0—20,0
	Смещение центров базовых сечений стыковочных поверхностей сборочных единиц, мм	1,0—1,5	0,5—1,0
	Взаимное положение базовых посадочных поверхностей сборочных единиц систем управления, угловая секунда	15,0—20,0	10,0—15,0
Стенды, стапели контроля выходных геометрических параметров	Отклонение от теоретического контура базовых поверхностей сборочных единиц, мм	1,0—1,5	1,0—2,0
	Непрямолинейность базовой продольной оси, угловая минута	2,0—3,0	0,25—0,5
	Неперпендикулярность базовых стыковочных поверхностей, угловая минута	0,5—0,1	5,0—10,0
	Закрутка базовых осей стыковочных поверхностей сборочных единиц, угловая минута	10,0—15,0	0,2—0,3
	Смещение центров базовых сечений стыковочных поверхностей сборочных единиц, мм	0,5—1,0	0,05—0,50
Стенды контроля массовых и инерционных характеристик	Относительная погрешность определения массы	0,25—0,10 %	0,025—0,050 %
	Погрешность определения координат положения центра масс, мм	0,6—7,0	0,1—2,0
	Относительная погрешность определения осевых и центробежных моментов инерции	0,5—1,5 %	0,01—0,30 %
Стенды проверки на функционирование	Степень имитации условий эксплуатации	90—95 %	95—99 %
	Габаритные размеры изделия, м	≤10,0	≤30,0
	Масса изделия, т	0,5—15,0	0,3—20,0

принципами, заложенными в основу принятой концепции; изготовление и конструкторско-технологическая отработка опытного образца СТО; серийное (мелкосерийное, единичное) производство и передача СТО в эксплуатацию. Критерием эффективности при этом является степень соответствия показателей технического уровня разрабатываемого СТО установленным базовым значениям.

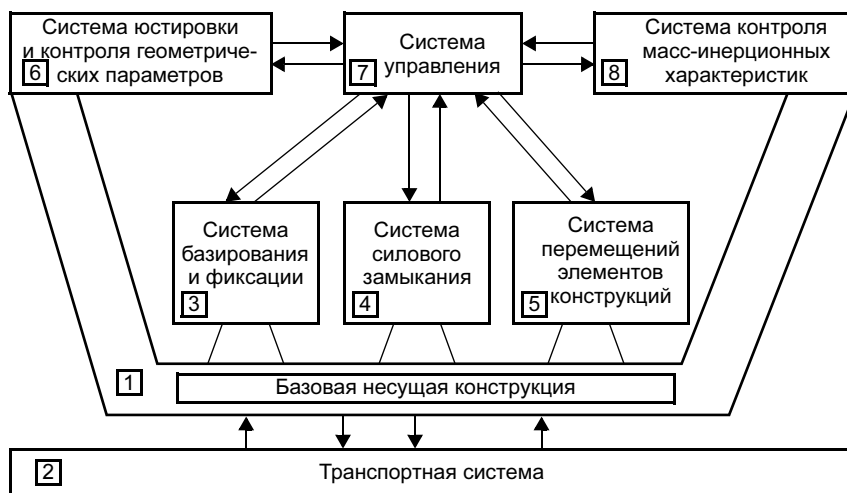
Обобщенная структурная схема типового СТО приведена на рисунке. В зависимости от принадлежности к составляющим номенклатурного перечня конкретные СТО содержат те или иные блоки, приведенные в обобщенной структуре. Так, для балансировочных стендов характерно наличие пятого, седьмого и восьмого блоков, для стендов контроля геометрии — блоков третьего, шестого и седьмого, для монтажно-стыковочного оборудования —

блоков второго—четвертого и т. д. Базовая несущая конструкция (блок 1) присутствует во всех СТО, но трансформируется в зависимости от их типа, от крупногабаритной стационарной металлоконструкции до базовой платформы с несколькими степенями свободы.

Уровень автоматизации сборочных процессов, трудоемкость которых в машиностроении составляет до 70 % общей трудоемкости изготовления изделия, не превышает 10—15 %. Причины низкого уровня автоматизации сборки в машиностроении известны [5, 6]: большое разнообразие кинематических и динамических связей в сборочном процессе, растущее по мере увеличения числа деталей в изготовлении; отсутствие высокопроизводительного гибкого сборочного оборудования и опыта его применения; качество поступающих на сборку деталей и др.

Сборочное производство изделий специального машиностроения, представляющих, как правило, крупногабаритные ступенчатые тела вращения большой массы, имеет дополнительные проблемы в вопросе автоматизации, связанные прежде всего с большим объемом пригоночных и доводочных работ, небольшими (зачастую единичными и мелкосерийными) объемами годовых выпусков изделий, высокой частотой партий запуска модифицированных изделий и несоответствием конструкций изделий условиям автоматизированной (автоматической) сборки. Характерной особенностью является отсутствие возможности существенного влияния на перечисленные факторы со стороны конструкторов и технологов — разработчиков технологии и оборудования сборочного производства.

В связи с этим внимание разработчиков уделяется автоматизи-



Обобщенная структурная схема типового СТО сборочного производства

зации непосредственно технологического оборудования и оснастки — СТО сборочного производства. В соответствии с предложенной схемой (см. рисунок) объектами автоматизации являются следующие блоки СТО:

— система базирования и фиксации — в части разработки конструкций механизмов и устройств, осуществляющих ориентацию сборочных единиц изделий относительно выбранных баз с требуемой точностью, и жесткого закрепления в конечном положении на базовой несущей конструкции СТО;

— система силового замыкания — в части разработки конструкций, механизмов и устройств, осуществляющих сопряжение собираемых сборочных единиц изделий, их соединение и контроль точности соединения;

— система перемещений элементов собираемых конструкций изделий — в части разработки конструкций механизмов и устройств, осуществляющих перемещение в пространстве, ограниченном рабочей зоной СТО, сборочных единиц (изделия) с заданными параметрами перемещения;

— транспортная система — в части разработки приводов, шасси, подвижных опор, а также устройств управления перемеще-

ниями базовой несущей конструкции СТО в пределах сборочного участка (цеха);

— система контроля масс-инерционных характеристик изделий — в части разработки силоизмерительной датчиковой аппаратуры, а также приборов для многопараметровых измерений на базе процессоров, регистрации и отображения в цифровой форме характеристик изделий в реальном масштабе времени;

— система юстировки и контроля геометрических параметров — в части разработки бесконтактных средств одновременных измерений многочисленных параметров изделий на базе оптических и оптико-электронных приборов с применением микропроцессорной техники;

— система управления — в части разработки механизмов и устройств управления оборудованием по жесткой программе с простой и сложной логическими структурами, а также в части разработки элементов адаптивных систем управления.

В процессе решения задачи обеспечения качества изделий специального машиностроения в сборочном производстве сформирована и апробирована общая концепция технологического синтеза — концепция "диалектиче-

ских инноваций". Ее суть заключается в синтезе конструкторско-технологических нововведений на диалектической основе научного мировоззрения. В данном случае основной диалектический принцип "подвергать все сомнению" выступает в роли отнюдь не скептицизма и тем более нигилизма, а как методологическое требование во всех конкретных случаях технологического проектирования основывать принимаемые решения на результатах точностного анализа конкретных технологических ситуаций. Не пытаться искать годные на все случаи рецепты в общеизвестных формулах технических решений предыдущих этапов эволюции, а руководствоваться базовыми принципами и методологией технологического синтеза. Концепция "диалектических инноваций" реализуется в рамках технологического синтеза путем последовательного формирования функциональных характеристик и принципов физической реализации разрабатываемых технологических процессов, а также формирования последовательно функциональных и физических структур, конструктивно-компоновочных схем средств технологического оснащения.

Основные технические решения, синтезированные в результате такого подхода, связаны с выбором (определением) и реализацией в оборудовании концепций вертикальной, горизонтальной и совмещенной сборки — для сборочных стендов; физических принципов уравнивания (контрольными грузами), определения реакций в опорах (силоизмерительными датчиками), определения углов наклона (угловыми датчиками в сочетании с газостатическим подвесом) — для стендов контроля массовых характеристик; принципов унифицированного, полифилярного или газостатического подвеса — для стендов определения инерционных ха-

СТЕНДЫ, СТАПЕЛИ ОБЩЕЙ СБОРКИ			
Концепция	Ретроспектива	Современное состояние	Перспектива
Функциональные характеристики Физическая реализация	Технологическое обеспечение общей сборки Площадки обслуживания, поворотные столы	Совмещение с операциями обезвешивания и юстировки Применение устройств обезвешивания и оптических приборов	Механизация и автоматизация сборочных операций Применение сборочных манипуляторов, автоматизация затяжки резьбовых соединений
Конструктивное воплощение	Стенды и стапели с подвижными и неподвижными площадками обслуживания, прокруточные устройства	Упругие подвесы, подвесы с противовесами, теодолиты и автоколлиматоры	Сбалансированные манипуляторы с фиксацией в любой точке рабочего пространства. Устройства для затяжки с активным контролем
МОНТАЖНО-СТЫКОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА			
Концепция	Ретроспектива	Современное состояние	Перспектива
Функциональные характеристики	Перемещение и позиционирование для сборки крупногабаритных элементов изделий. Затяжка единичных резьбовых соединений с заданным крутящим моментом	Увеличение числа степеней свободы монтажно-стыковочных тележек. Затяжка стыков с одновременным приложением момента затяжки к группе резьбовых соединений с контролем по крутящему моменту	Контроль стыкуемых поверхностей, телеуправление. Групповая затяжка стыков с активным контролем усилия затяжки
Физическая реализация	Тележки несамходные. Применение гидравлических и механических приводов для перемещения элементов изделий. Механические системы создания момента типа кулачок—ролик	Применение пневмоподвесов и многоскоростных электроприводов с контролем усилия затяжки по давлению	Телевизионные системы управления, применение силовых чувствительных датчиков при стыковке. Использование акустических и магнитоэлектрических методов контроля усилия затяжки с точностью до 1—3 %
Конструктивное воплощение	Монтажно-стыковочные тележки с приводами и гидродомкратами. Ключи моментные с регулировкой предельного момента	Монтажно-стыковочные тележки с многоскоростными приводами перемещений при малых усилиях стыковки. Фланцевые приспособления и устройства для затяжки с датчиками давления в приводе	Монтажно-стыковочные тележки с полуавтоматической стыковкой. Механо-измерительные комплексы с пьезо- и магнитоизмерительными датчиками усилий
СТЕНДЫ И КОМПЛЕКТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СБОРКИ-СВАРКИ			
Концепция	Ретроспектива	Современное состояние	Перспектива
Функциональные характеристики	Фиксация лепестков секций на одном общем ложементе, каркасе	Фиксация лепестков секций на независимых ложементах с перемещением для раскрытия стыков под сварку	Обтяжка лепестков секций на ложементах
Физическая реализация	Применение ручных зажимных приспособлений	Применение пневмозажимов на прижимных съемных балках	Применение прижимных балок с механизированным отводом прижимов с тангенциальным приложением нагрузки
Конструктивное воплощение	Стапели и стенды каркасной конструкции	Механизированные стенды со съемными стапелями	Автоматизированные многопозиционные комплексы и оснастка
СТЕНДЫ ПРОКРУТКИ И КАНТОВАНИЯ			
Концепция	Ретроспектива	Современное состояние	Перспектива
Функциональные характеристики	Перевод изделия из вертикального положения в горизонтальное. Прокрутка изделия в горизонтальном положении	Кантование на любой угол от 0 до 90° с одновременным вращением изделия вокруг продольной оси. Контроль функционирования	Селекция слабых шумов
Физическая реализация	Применение механических систем типа телескопический винт	Применение гидрооборудования для изделий массой до 15 т	Применение акустической электронной аппаратуры
Конструктивное воплощение	Стенды с электроприводом и ручным управлением	Прокруточные стенды-полуавтоматы с пониженными собственными шумовыми характеристиками	Шумодиагностические комплексы с акустическими датчиками и селекцией слабых шумов
СТЕНДЫ СБОРКИ И КОНТРОЛЯ			
Концепция	Ретроспектива	Современное состояние	Перспектива
Функциональные характеристики	Стапельная неуниверсальная сборка	Сборка на универсальных унифицированных стапелях	Совмещение сборки и контроля с имитацией условий эксплуатации
Физическая реализация	Применение ручных зажимных стационарных устройств и базовых элементов. Контроль геодезическими приборами	Применение унифицированных стоек, зажимов, базовых элементов, допускающих переналадку. Контроль геодезическими приборами и контактными датчиками	Применение универсальных механизированных стендов, бесконтактных датчиков с цифровой индикацией
Конструктивное воплощение	Стенды сборки рамно-ферменной конструкции	Многостоечные стапели с элементами выставки и контроля изделий	Стенды с модульным принципом построения

СТЕНДЫ СБОРКИ И ПРОВЕРКИ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ			
Концепция	Ретроспектива	Современное состояние	Перспектива
Функциональные характеристики Физическая реализация Конструктивное воплощение	Проверка функционирования с имитацией невесомости Применение блочных систем с уравновешивающими грузами Эстакады с площадками обслуживания и элементами подвеса	Уменьшение влияния сил трения, вызываемых гравитацией Применение блочных систем с компенсаторами Механические фрикционные приводы, пьезоэлектрические вибраторы	Исключение влияния сил трения, совмещение с операциями контроля Применение поплавковых и аэростатических систем обезвешивания Механизированные приводы, бесконтактные следящие системы
СТЕНДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ И КООРДИНАТ ЦЕНТРА МАСС			
Концепция	Ретроспектива	Современное состояние	Перспектива
Функциональные характеристики Физическая реализация Конструктивное воплощение	Измерение действительных значений массы и координат центра масс Измерение реакций в опорах, уравновешивание относительно прецизионных опор, измерение углов равновесия Силоизмерительные датчики, датчики углового положения, уровни, весы, меры веса	Совмещенное определение массы и координат центра масс. Автоматизация обработки результатов Увеличение числа степеней свободы перемещения изделия при измерениях. Автоматизация обработки и снятия результатов измерений Высокоточная аппаратура измерения линейных, угловых и динамических величин с цифровой индикацией	Совмещение с операциями сборки и транспортировки. Автоматизация управления процессом измерений Использование сборочной и транспортной оснастки. Применение микропроцессорной оснастки. Применение микропроцессорной техники для управления процессом измерений Специальные траверсы и сборочные панели
СТЕНДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ			
Концепция	Ретроспектива	Современное состояние	Перспектива
Функциональные характеристики Физическая реализация Конструктивное воплощение	Измерение моментов инерции относительно различных осей в системе координат изделия Методы физического маятника, полифиляра, унифиляра и т. п. Колебательные стенды с прецизионными аэростатическими подшипниками и оптоэлектронной системой измерений	Полная автоматизация с учетом методических, диссипативных и нелинейных факторов Оптимальные схемы позиционирования автоколебательных систем, управляющие ЭВМ Автоматизированные устройства позиционирования изделия, электромагнитные колебательные приводы, приборный интерфейс	Измерение моментов инерции нежестких, крупногабаритных и содержащих жидкостную компоненту изделий Электромеханические системы с обратными связями с широким диапазоном режимов многостепенных маятников Специальные траверсы и сборочные панели

рактических; контактных (механических, ультразвуковых, лазерных) методов контроля в сочетании с обезвешиванием конструкций — для стендов определения выходных геометрических параметров; принципа совмещения сборочных, контрольно-измерительных, диагностических операций, а также операций контроля масс-инерционных характеристик изделий и др.

Результаты выполненных исследований и разработок в обобщенной форме представлены в табл. 2 по восьми номенклатурным направлениям создания технологий и оборудования сборочного производства изделий специ-

ального машиностроения: стенды, стапели общей сборки; монтажно-стыковочное оборудование и оснастка; стенды и комплекты оборудования для сборки-сварки; стенды прокрутки и кантования, сборки и контроля выходных геометрических параметров, сборки и проверки на функционирование, измерения массы и координат центра масс (стенды статической балансировки), измерения моментов инерции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медарь А. В., Задерев В. Н. Автоматизация и механизация общей сборки изделий машиностроения // Технология производства. 1985. Сер. XIII. Вып. 8. С. 61—68.
2. Медарь А. В. Направления развития теории проектирования средств технологического оснащения сборочного производства // Технология производства. 1987. Сер. XIII. Вып. 3. С. 179—182.
3. Медарь А. В. Средства технологического оснащения сборки, сварки и испытаний // Технология производства. 1987. Сер. XIII. Вып. 8. С. 5—12.
4. Сорокоумов А. Н., Наумов С. В., Медарь А. В. Перспективы развития автоматизации методов определения характеристик геометрии масс // Технология производства. 1986. Сер. XIII. Вып. 5. С. 76—80.
5. Медарь А. В. Обеспечение технического уровня средств технологического оснащения сборочного производства // Технология машиностроения. 1987. Вып. 10. С. 109—113.
6. Медарь А. В., Бондаренко И. А. Автоматизация и механизация сборочного производства изделий отрасли. М.: ГОНТИ-2, 1984. 114 с.

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А. И. ХОРЕВ, д-р техн. наук
ВИАМ

Влияние комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла ($\alpha\gamma + \beta$)- и β -титановых сплавов

Введение

Современные конструкционные титановые сплавы и присадочные материалы обеспечивают высокую надежность сварных конструкций¹.

В перспективных летательных аппаратах в большом объеме будут применяться титановые сплавы с уровнем прочности 1100 МПа и удельной прочностью $\sigma_B/\gamma \geq 24$ км, имеющие преимущество по весовой эффективности перед алюминиевыми сплавами и сталями. Сварные конструкции будут доминировать, так как они более технологичны при изготовлении и обеспечивают достижение более высоких значений коэффициента использования металла. Поэтому уровень механических свойств сварных соединений является главным фактором, определяющим перспективу применения конструкционного титанового сплава [1—3].

Требования, предъявляемые к титановым сплавам

К современным конструкционным титановым сплавам предъявляются следующие требования:

- обеспечение предела прочности полуфабрикатов (листов, плит, поковок, штамповок и др.) не менее 1100 МПа;
- обеспечение предела прочности сварного соединения $\sigma_{В.С.С} \geq 0,9\sigma_{В.О.М}$ ($\sigma_{В.С.С} \geq 990$ МПа);
- обеспечение удельной прочности $\sigma_B/\gamma \geq 24$ км (условная единица, отражающая длину нити, которая выдерживает свою массу без разрушения);
- относительно невысокая стоимость, так как стоимость материалов является одной из главных составляющих стоимости изделия в целом;
- универсальность в плане изготовления всех видов полуфабрикатов и создания всех типов (сварных, паяных и монолитных) конструкций;

¹ За работу по созданию более двадцати конструкционных свариваемых титановых сплавов и их эффективное применение в более семидесяти космических аппаратах, самолетах и ракетах коллективу авторов вручены медали и дипломы лауреатов премии Правительства РФ (руководитель работ — профессор, д-р техн. наук А. И. Хорев).

- обеспеченность сырьевыми ресурсами страны и возможность серийного крупномасштабного производства;
- хорошая свариваемость и технологичность при сварке;
- технологическая пластичность и возможность получения деталей требуемой формы при горячей, изотермической или холодной штамповке с последующей термофиксацией в штампах или специальных приспособлениях;
- технологичность при термической обработке (энергоёмкость, трудоёмкость, степень сложности процесса);
- технологичность при механической обработке резанием.

Характеристика удельной прочности является главной, определяющей весовую эффективность и снижение массы конструкций.

Для достижения заданной весовой эффективности сварной конструкции можно идти в двух направлениях:

- повышения прочности основного материала при $\sigma_{В.С.С}/\sigma_{В.О.М} = 0,9$;
- повышения значения $\sigma_{В.С.С}/\sigma_{В.О.М}$.

При удельной прочности 24 км удельная прочность сварного соединения должна составлять 0,9 от 24 км, что соответствует 21,6 км.

Если увеличить соотношение прочностей сварного соединения и основного металла от 0,9 до 0,95 путем усовершенствования сварки, то требуемая задача может быть решена при удельной прочности основного материала $21,6/0,95 = 22,73$ км. Эта прочность основного материала может быть успешно достигнута на сплаве типа ВТ23 (ВТ23М) в отожженном состоянии и обеспечить заданную конструкторами весовую эффективность.

Необходимо обратить внимание конструкторов и расчетчиков прочности на достижение конечной цели — весовой эффективности и надежности, так как плотность конструкционных титановых сплавов может изменяться от 4500 до 6200 кг/м³, отношение $\sigma_{В.С.С}/\sigma_{В.О.М}$ — от 0,7 до 0,95.

Сплавы с повышенной плотностью и пониженной прочностью сварных соединений для достижения заданной цели необходимо подвергать упрочне-

нию при термической обработке до более высокой прочности основного материала, что, как правило, сопровождается снижением надежности в работе.

Ниже представлены результаты исследований с оценкой механических и технологических свойств, плотности сплавов, а также экономических аспектов рассматриваемых задач [3—7].

Исследование влияния комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла титановых сплавов

Исследовали листы толщиной 1,5 мм комплекснолегированных титановых сплавов системы Ti—Al—Mo—V—Cr—Fe. Основным материал и сварные соединения подвергали термической обработке по различным режимам [3, 6, 7].

1. Сплав $(\alpha + \beta)$ -Ti—3Al—0,8Mo—2V—0,55Cr—0,4Fe, содержащий β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном 4 % молибдена (закаливается на мартенситную α' -фазу пониженной пластичности), с температурой полного полиморфного превращения $T_{пп} = 910$ °С, плотностью 4550 кг/м³. После закалки с $(T_{пп} - 50)$ °С + старение (500 °С, 10 ч) сплав приобретает следующие механические свойства: $\sigma_{в.о.м} = 1118$ МПа (пластичность, оцениваемая углом изгиба при радиусегиба, равном толщине листа, $\angle_{о.м} = 50^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 25$ км, $\sigma_{в.с.с} = 1020$ МПа ($\angle_{с.с} = 45^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 22,9$ км.

2. Сплав $(\alpha + \beta)$ -Ti—6Al—0,8Mo—2V—0,55Cr—0,4Fe, содержащий β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном 4 % молибдена, как и предыдущий сплав, но содержащий повышенное количество алюминия (6 %), что приводит к повышению температуры полиморфного превращения до 970 °С (на 60 °С) и снижению плотности до 4495 кг/м³ (на 5,5 кг/м³). Сплав имеет следующие механические свойства после отжига: $\sigma_{в.о.м} = 1117$ МПа ($\angle_{о.м} = 60^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 26,7$ км, $\sigma_{в.с.с} = 1098$ МПа ($\angle_{с.с} = 58^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 24,9$ км.

3. Сплав $(\alpha + \beta)$ -Ti—3Al—1,3Mo—2,7V—0,8Cr—0,6Fe, содержащий β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном 6 % молибдена, с температурой полного полиморфного превращения $T_{пп} = 880$ °С, плотностью 4600 кг/м³, имеет следующие механические свойства после закалки с $(T_{пп} - 50)$ °С + старение (550 °С, 10 ч): $\sigma_{в.о.м} = 1128$ МПа ($\angle_{о.м} = 65^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 25$ км, $\sigma_{в.с.с} = 1118$ МПа ($\angle_{с.с} = 55^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 24,7$ км.

4. Сплав $(\alpha + \beta)$ -Ti—6Al—1,3Mo—2,7V—0,8Cr—0,6Fe, содержащий β -стабилизирующие элементы, как и в сплаве № 3 в количестве, эквивалентном 6 % молибдена, с температурой полного полиморфного превращения $T_{пп} = 960$ °С (дополнительное на 3 % содержание α -стабилизатора алюминия повышает температуру превращения на 60 °С), плотностью 4545 кг/м³ (на 55 кг/м³ ниже, чем в предыду-

щем сплаве за счет содержания 3 % Al с плотностью 2700 кг/м³). Механические свойства после отжига при $(T_{пп} - 150)$ °С: $\sigma_{в.о.м} = 1236$ МПа ($\angle_{о.м} = 60^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 27,7$ км, $\sigma_{в.с.с} = 1157$ МПа ($\angle_{с.с} = 45^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 26$ км. Данный сплав удовлетворяет предъявленным требованиям по механическим свойствам основного материала и сварных соединений, однако присутствие в сплаве 6 % алюминия создает трудности при прокатке листов и уменьшает технологическую пластичность по углугиба основного материала с 74 до 60°.

5. Сплав $(\alpha + \beta)$ -Ti—3Al—1,8Mo—3,4V—0,8Cr—0,6Fe, содержащий β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном 7 % молибдена, имеет температуру полного полиморфного превращения $T_{пп} = 880$ °С, плотность 4610 кг/м³ (увеличение в сплаве содержания Al на 3 % снизит плотность до 4540 кг/м³). При закалке из β -области и высоких температурах $(\alpha + \beta)$ -области в сплаве фиксируется пластичная α'' -фаза. Механические свойства сплава после отжига при $(T_{пп} - 150)$ °С (730 °С): $\sigma_{в.о.м} = 1138$ МПа ($\angle_{о.м} = 86^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 25,2$ км, $\sigma_{в.с.с} = 1059$ МПа ($\angle_{с.с} = 80^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 23,5$ км.

Сплав обладает по сравнению с предыдущими сплавами лучшим сочетанием прочности и пластичности основного материала и сварных соединений листов в отожженном состоянии. Так, после закалки с $(T_{пп} - 50)$ °С (830 °С) + старение (550 °С, 10 ч): $\sigma_{в.о.м} = 1226$ МПа ($\angle_{о.м} = 56^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 27$ км, $\sigma_{в.с.с} = 1157$ МПа ($\angle_{с.с} = 54^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 25,6$ км.

Сплав отличается более высоким уровнем свойств по сравнению с предыдущими сплавами.

6. Сплав $(\alpha + \beta)$ -Ti—3Al—1,8Mo—3,4V—1,1Cr—0,6Fe содержит β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном 8 % молибдена за счет увеличения по сравнению с предыдущим сплавом № 5 эвтектоидообразующих β -стабилизаторов: хрома — на 0,3 % и железа — на 0,15 %; температура полного полиморфного превращения сплава снизилась до $T_{пп} = 870$ °С, плотность сплава — 4650 кг/м³. Сплав имеет следующие механические свойства после закалки с $(T_{пп} - 50)$ °С (820 °С) + старение (550 °С, 10 ч): $\sigma_{в.о.м} = 1206$ МПа ($\angle_{о.м} = 49^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 26,5$ км, $\sigma_{в.с.с} = 1138$ МПа ($\angle_{с.с} = 37^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 25,7$ км.

Сплав обладает высокими механическими свойствами основного материала и сварных соединений, но пластичность его несколько ниже, чем у предыдущего сплава.

При легировании β -стабилизаторами в количестве, эквивалентном 8 % Mo, эффективнее использовать большее количество изоморфных элементов (Mo = 2 %, V = 4,5 %) и меньшее эвтектоидообразующих элементов (Cr = 1,0 %, Fe = 0,5 %).

7. Сплав $(\alpha + \beta)$ -Ti—6Al—1,8Mo—3,4V—1,1Cr—0,75Fe, содержащий β -стабилизаторы, как и предыдущий сплав, в количестве, эквивалентном 8 % молибдена, но на 3 % больше алюминия. Температу-

ра полного полиморфного превращения $T_{пп} = 940\text{ }^\circ\text{C}$, плотность 4595 кг/м^3 .

Сплав в отожженном при ($T_{пп} - 150$) $^\circ\text{C}$ (810 $^\circ\text{C}$) состоянии имеет следующие механические свойства основного материала и сварных соединений: $\sigma_{в.о.м} = 1255\text{ МПа}$ ($\angle_{о.м} = 56^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 27,9\text{ км}$, $\sigma_{в.с.с} = 1157\text{ МПа}$ ($\angle_{с.с} = 48^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 25,7\text{ км}$. Сплав отличается высокой технологической пластичностью основного материала (56 $^\circ\text{C}$) и сварного соединения (54 $^\circ\text{C}$), а также высокой удельной прочностью основного материала и сварных соединений, что позволит снизить массу конструкции и повысить ресурсные характеристики.

Сплав с содержанием алюминия 6 % предпочтительнее использовать для изготовления поковок, штамповок, плит, так как к таким полуфабрикатам не предъявляются высокие требования по технологической пластичности, которые обычно предъявляются к листам, в которых содержание алюминия желательнее ограничивать 5,0—5,5 %.

8. Сплав ($\alpha + \beta$)-Ti—6Al—2,8Mo—4,8V—1,1Cr—0,75Fe, содержащий β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном 10 % молибдена. Это последний исследованный ($\alpha + \beta$)-сплав докритической концентрации ($C_{кр} =$ эквиваленту 11 % Mo). Сплав имеет температуру полного полиморфного превращения $T_{пп} = 910\text{ }^\circ\text{C}$, плотность 4680 кг/м^3 . В отожженном при ($T_{пп} - 150$) $^\circ\text{C}$ состоянии: $\sigma_{в.о.м} = 1275\text{ МПа}$ ($\angle_{о.м} = 58^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 27,8\text{ км}$, $\sigma_{в.с.с} = 1079\text{ МПа}$ ($\angle_{с.с} = 42^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 23,5\text{ км}$.

9. Сплав β -Ti—3Al—3,8Mo—6,2V—1,4Cr—0,9Fe содержит β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном 13 % молибдена. Это первый сплав закрытой концентрации, закалывающийся с температуры β -области на ($\beta + \omega$)-фазы. На ранней стадии низкотемпературного старения в сплаве также образуется хрупкая ω -фаза. Сплав имеет сравнительно высокую плотность $\gamma = 4820\text{ кг/м}^3$ и пониженную температуру полиморфного превращения $T_{пп} = 820\text{ }^\circ\text{C}$. Механические свойства после отжига при ($T_{пп} - 150$) $^\circ\text{C}$ (670 $^\circ\text{C}$): $\sigma_{в.о.м} = 1098\text{ МПа}$ ($\angle_{о.м} = 30^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 23,2\text{ км}$, $\sigma_{в.с.с} = 1020\text{ МПа}$ ($\angle_{с.с} = 36^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 21,6\text{ км}$; после закалки с ($T_{пп} - 50$) $^\circ\text{C}$ + старение (550 $^\circ\text{C}$, 10 ч): $\sigma_{в.о.м} = 1294\text{ МПа}$ ($\angle_{о.м} = 37^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 27,4\text{ км}$, $\sigma_{в.с.с} = 1157\text{ МПа}$ ($\angle_{с.с} = 22^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 24,5\text{ км}$.

Сравнение сварных соединений β -сплава № 9 и ($\alpha + \beta$)-сплава № 5 в отожженном состоянии показало, что у сплава № 5 удельная прочность выше на 2 км и пластичность по углу гiba больше в 2 раза.

Аналогичное сравнение β - и ($\alpha + \beta$)-сплавов в закаленном и состаренном при 550 $^\circ\text{C}$ в течение 10 ч состоянии также показало преимущество ($\alpha + \beta$)-сплава как по удельной прочности сварного соединения (($\alpha + \beta$) — 25,6 км, β — 24,5 км), так и по пластичности (($\alpha + \beta$) — 54 $^\circ$, β — 22 $^\circ$) [3, 7] (рис. 1).

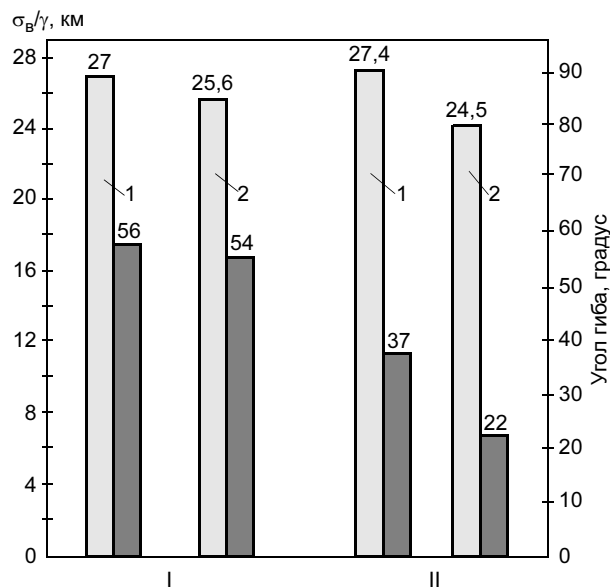


Рис. 1. Удельная прочность (светлые столбцы) и пластичность (темные) ($\alpha + \beta$)-сплава (№ 5) Ti—3Al—1,8Mo—3,4V—0,8Cr—0,6Fe (I) и β -сплава (№ 9) Ti—3Al—3,8Mo—6,2V—1,4Cr—0,9Fe (II): 1 — основной металл; 2 — сварное соединение

10. Сплав β -Ti—3Al—3,8Mo—6,2V—2,3Cr—1,4Fe (типа BT19) содержит β -стабилизирующие элементы в количестве, эквивалентном 16 % молибдена за счет большего количества хрома и железа, температура полиморфного превращения $T_{пп} = 810\text{ }^\circ\text{C}$, плотность $\gamma = 4870\text{ кг/м}^3$. Сплав при закалке из β -области закаливается на пластичную β -фазу, которая обеспечивает ему высокую технологическую пластичность при формообразовании. В сплаве не образуется ω -фаза в процессе охлаждения или нагрева при низких температурах. Механические свойства:

— после отжига при ($T_{пп} - 150$) $^\circ\text{C}$ (660 $^\circ\text{C}$, низкотемпературный нагрев): $\sigma_{в.о.м} = 1304\text{ МПа}$ ($\angle_{о.м} = 30^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 27,3\text{ км}$, $\sigma_{в.с.с} = 1177\text{ МПа}$ ($\angle_{с.с} = 36^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 24,7\text{ км}$;

— после закалки с ($T_{пп} - 50$) $^\circ\text{C}$ (760 $^\circ\text{C}$, высокотемпературный нагрев) снижаются прочностные показатели: $\sigma_{в.о.м} = 1138\text{ МПа}$ ($\angle_{о.м} = 38^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 23,8\text{ км}$, $\sigma_{в.с.с} = 1098\text{ МПа}$ ($\angle_{с.с} = 39^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 23\text{ км}$;

— после закалки с ($T_{пп} - 50$) $^\circ\text{C}$ (760 $^\circ\text{C}$) + старение (550 $^\circ\text{C}$, 10 ч): $\sigma_{в.о.м} = 1422\text{ МПа}$ ($\angle_{о.м} = 66^\circ$), $\sigma_{в.о.м}/\gamma = 29,8\text{ км}$, $\sigma_{в.с.с} = 1098\text{ МПа}$ ($\angle_{с.с} = 10^\circ$), $\sigma_{в.с.с}/\gamma = 23\text{ км}$.

Сравнение β -сплава № 10 и ($\alpha + \beta$)-сплава № 5 в отожженном состоянии при удельной прочности сварного соединения 23 км показало, что пластичность ($\alpha + \beta$)-сплава ($\angle_{с.с} = 80^\circ$) выше, чем β -сплава ($\angle_{с.с} = 39^\circ$).

В термически упрочненном состоянии (старение при 550 $^\circ\text{C}$ в течение 10 ч) при большей на 1,1 км удельной прочности ($\alpha + \beta$)-сплава пластичность его сварного соединения в 2,5 раза выше, чем у β -сплава.

С увеличением легирования в сплавах, охлажденных с высоких температур после окончания деформации полуфабрикатов, фиксируются α' , α'' , ($\beta + \omega$)- и β -фазы (см. рис. 1). У сплавов, в которых наряду с β -фазой фиксируется хрупкая ω -фаза, возможно растрескивание полуфабриката в процессе охлаждения, что потребовало принятия специальных мер при изготовлении экспериментальных листов. Сплавы, находящиеся в области фиксации пластичной α'' -фазы (типа ВТ23), сохраняют высокую пластичность независимо от условий охлаждения, что очень важно при изготовлении полуфабрикатов и деталей.

На диаграмме состояния титан— β -стабилизирующие элементы (рис. 2) приведены кривые изменения механических свойств сварных соединений в зависимости от количества β -стабилизирующих элементов в сплавах с содержанием алюминия 3 %.

В термически упрочненном состоянии пластичность сварных соединений, оцениваемая угломгиба при радиусегиба, равном толщине листа ($r = t$), с увеличением содержания β -стабилизирующих элементов непрерывно снижается, а предел прочности сварного соединения проходит через максимум, соответствующий сплаву Ti—3Al—1,8Mo—3,4V—0,8Cr—0,6Fe (типа ВТ23). Этот сплав при высокой прочности сварного соединения, равной 1380 МПа, обладает удовлетворительной пластич-

ностью металла шва и зоны термического влияния, оцениваемой по углугиба 40° .

С увеличением количества β -стабилизирующих элементов (Mo + V + Cr + Fe) в сплавах:

- стоимость шихтовых материалов для выплавки слитков при увеличении содержания β -стабилизаторов на величину, эквивалентную 1 % молибдена, возрастает на 5 %;
- увеличивается неоднородность химического состава слитка, которая возрастает в большей мере у слитков большего диаметра;
- снижается температура $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращения и уменьшается технологичность деформации, особенно в $\alpha + \beta$ -области;
- повышается плотность сплава;
- увеличивается химическая неоднородность в металле шва сварного соединения, особенно при сварке больших толщин;
- увеличивается энергоемкость и трудоемкость термической обработки из-за повышения стабильности β -фазы, требующей более сложной и длительной термической обработки;
- ухудшается обрабатываемость резанием из-за увеличения содержания вязкой β -фазы и налипания сплава на режущую кромку;
- увеличивается дисперсия механических свойств, обусловленная химической неоднородностью и неоднородностью распада метастабильных фаз;
- увеличивается трудоемкость изготовления деталей.

Теоретические аспекты комплексного легирования

Установлена эффективность комплексного легирования сплавов с целью большего упрочнения α - и β -твердых растворов и уменьшения разности в их прочности для достижения более однородного пластического деформирования при нагружении и более полной реализации прочности α - и β -фаз [1].

Показано, что при близкой прочности α - и β -твердых растворов фрагменты структуры в виде острых пластин α -фаз перестают быть внутренними концентраторами напряжения, приводящими к снижению эксплуатационных свойств, особенно это важно в том случае, когда сплав работает при наличии внешних концентраторов напряжения.

Рекомендовано легирование β -стабилизирующими элементами противоположного действия при дендритной ликвации с целью обеспечения постоянства суммарного количества β -стабилизирующих элементов в разных зонах, более однородного упрочнения пересыщенного твердого раствора, большей равномерности распределения и улучшения морфологии фазовых составляющих.

Одновременное легирование легирующими элементами — Mo с коэффициентом распределе-

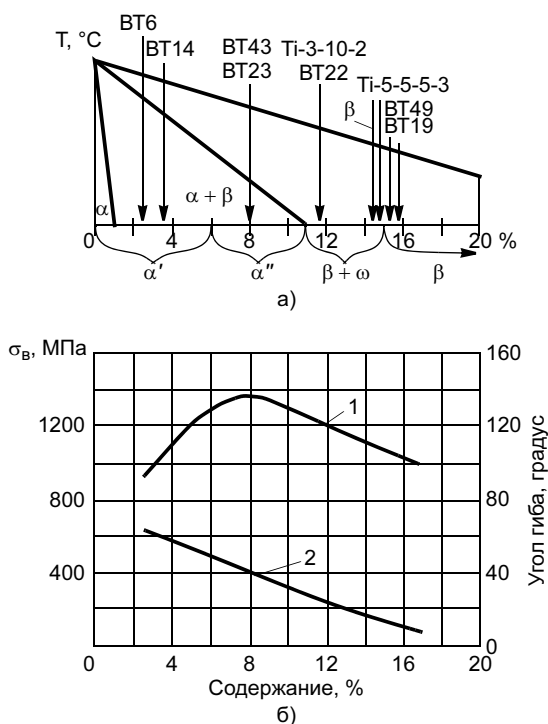


Рис. 2. Схема диаграммы состояния (а) и зависимость предела прочности (1) и технологической пластичности (2) сварного соединения от содержания β -стабилизаторов, эквивалентного содержанию молибдена (термически упрочненное состояние) (б)

ния при дендритной ликвации $K_{Mo} > 1$ (большая концентрация по осям дендрита), хромом или железом с коэффициентами $K_{Cr} < 1$ и $K_{Fe} < 1$ и ванадием, который практически однородно распределяется ($K_V \sim 1$), обеспечивает более однородное суммарное количество β -стабилизирующих элементов в металле шва сварного соединения, а также в металле литой структуры слитка, которая наследственно влияет на однородность химического состава полуфабрикатов.

При комплексном легировании целесообразно соблюдать соотношение изоморфных и эвтектоидообразующих элементов, выраженное в эквивалентных величинах от 2:1 до 1:1.

Такое соотношение обеспечивает подавление изоморфными элементами (Mo, V) эвтектоидного распада, особенно в металле сварного соединения, обусловленного введением эвтектоидообразующих элементов (Cr, Fe) в сплав.

Разработанная теория комплексного легирования конструкционных титановых сплавов [1] и теория легирования присадочных материалов [2] для сварки α -, $(\alpha + \beta)$ - и β -титановых сплавов обеспечили развитие современных титановых сплавов и обеспечение высокой весовой эффективности конструкций летательных аппаратов.

На основе разработанной теории комплексного легирования были созданы $\alpha + \beta$ - (BT23) и β - (BT19) титановые сплавы [1].

Сплав BT23 системы Ti—Al—Mo—V—Cr—Fe содержит β -стабилизирующие элементы в количестве, эквивалентном 7—8 % Mo, сплав BT19 системы Ti—Al—Mo—V—Cr—Zr — 14—17 % Mo [13]. Значительно позже (через 30 лет) был предложен сплав Ti—5—5—5—3 (практически одинакового состава² со сплавом BT19), содержащий β -стабилизирующие элементы в количестве, эквивалентном 13,8—17,0 % Mo. Сплавы содержат одинаковое количество циркония (1 %), оптимальное, как установлено, для всех β -титановых сплавов (выполняющего функцию модификатора и раскислителя приграничных объемов), одинаковое количество молибдена и ванадия [1].

Комплекснолегированные β -сплавы BT19 и Ti—5—5—5—3 по сравнению с β -сплавом Ti—3—10—2 (Ti—3Al—10V—2Fe, США) обладают более высокими механическими свойствами при большей их стабильности. Однако лучшие комплекснолегированные β -сплавы по механическим, технологическим и экономическим характеристикам значительно уступают $\alpha + \beta$ -титановому сплаву BT23. Сплав BT23 по сравнению с β -сплавами дешевле на 30 %, имеет меньшую плотность, лучшую обрабатываемость давлением и резанием, менее энергоемок при производстве полуфабрикатов и из-

делий, обладает универсальной применимостью в монолитных, сварных и паяных конструкциях.

Практическая реализация теории комплексного легирования³

Наиболее перспективный комплекснолегированный $(\alpha + \beta)$ -сплав BT23 и разработанные технологические процессы успешно применены при создании ряда современных конструкций авиакосмической техники (рис. 3).

Общая масса деталей, изготовленных из сплава BT23 после ВТМО в ракетно-космическом комплексе "Энергия-Буран", 6 т, в "Энергии" — 14 т (шпангоуты, балки, лонжероны и стыковочные узлы).

В космическом корабле "Астрон" шаровые баллоны изготовлены из сплава BT23 путем сверхпластической деформации, сварки и термоупрочнения ($\sigma_B > 1250$ МПа).

Из сплава BT23 в гидросамолете Бе-200 изготовлены гидроаккумуляторы и силовые детали.

Детали шасси в спортивном самолете Су-29 (Су-26, Су-31, Су-31М, Су-31СК, Як-55) выполнены

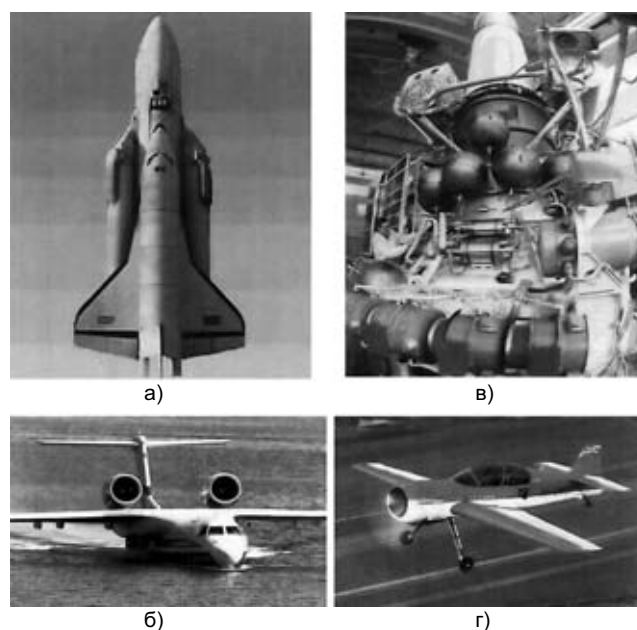


Рис. 3. Конструкции авиакосмической техники, содержащие детали из комплекснолегированного $(\alpha + \beta)$ -титанового сплава BT23: а — ракетно-космический комплекс "Энергия-Буран"; б — космический корабль "Астрон"; в — гидросамолет Бе-200; г — спортивный самолет Су-29

³ Автором работы разработаны 24 титановых сплава и 227 технологических процессов, опубликованы 4 монографии, более 200 статей, получены 326 патентов авторских свидетельств на изобретение, более 200 из которых применено в промышленности, 74 вошло в состав лицензий, проданных за рубеж.

² Патент 2169204, 2169782 (РФ).

из сплава ВТ23 с применением высокоскоростной закалки и старения ($\sigma_B \geq 1250$ МПа).

Комплекснолегируемый β -сплав ВТ19, имеющий значительные преимущества по механическим свойствам перед другими β -сплавами, прошел успешные испытания при разработке цилиндрических емкостей, работающих под внутренним давлением, и в деталях типа тарельчатых пружин.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны теоретические аспекты теории легирования и сформулированы основные принципы комплексного легирования титановых сплавов. На основе разработанной теории комплексного легирования созданы $\alpha + \beta$ -(ВТ23) и β -(ВТ19), (ВТ 19-1) титановые сплавы.

2. Комплексное легирование одновременно четырьмя β -стабилизаторами (Mo + V + Cr + Fe) обеспечивает получение более высокого уровня механических и технологических свойств ($\alpha + \beta$)- и β -сплавов по сравнению с легированием одним или двумя β -стабилизаторами при их относительно невысокой стоимости за счет использования хрома и железа.

3. Сварные соединения β -сплавов по свойствам существенно уступают ($\alpha + \beta$)-сплавам, особенно в термически упрочненном состоянии.

4. Оптимальные механические свойства основного материала и сварных соединений имеет ($\alpha + \beta$)-сплав Ti—3Al—1,8Mo—3,4V—0,8Cr—0,6Fe, содержащий β -стабилизирующие элементы в количестве, эквивалентном 7 % молибдена.

5. В сплаве для поковок, штамповок и плит, для изготовления которых не требуется повышенная технологическая пластичность в отличие от листов, содержание алюминия целесообразно увеличить до 6 %.

6. На комплекснолегируемом ($\alpha + \beta$)-сплаве Ti—3Al—1,8Mo—3,4V—0,8Cr—0,6Fe (типа ВТ23) в отожженном состоянии получен уровень предела прочности основного материала 1138 МПа, в термически упрочненном состоянии — 1226 МПа.

7. По сравнению с β -сплавом, содержащим β -стабилизаторы в количестве, эквивалентном 13 % молибдена, $\alpha + \beta$ -сплав, содержащий β -стабилизаторы, эквивалентные 7 % Mo (типа ВТ23), имеет на 2 км большую удельную прочность и в 2,5 раза большую пластичность, а также на 30 % дешевле (по шихте).

8. Для β -сплавов процесс обточки слитков и строжки слябов более трудоемкий, чем для ($\alpha + \beta$)-сплавов.

9. Комплекснолегируемый ($\alpha + \beta$)-сплав Ti—3Al—1,8Mo—3,4V—0,8Cr—0,6Fe отвечает всем требованиям, предъявляемым к современным конструкционным титановым сплавам.

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 А. И., Хорев М. А. Современные титановые сплавы в авиакосмической технике // Авиакосмическая техника и технология. 1997. № 1. С. 15—22.
4. Хорев М. А. Упрочнение сварных соединений титановых сплавов, полученных электронно-лучевой сваркой // МИТОМ. 1985. № 1. С. 52—54.
5. Хорев М. А. Дендритная ликвация в металле шва сварных соединений титановых сплавов // Сварочное производство. 1989. № 5. С. 37—39.
6. *Металловедение титана и его сплавов* / С. П. Белов, А. И. Хорев, М. А. Хорев и др. М.: Металлургия, 1992. 352 с.
7. Хорев А. И., Хорев М. А. Титановые сплавы и технологические процессы для космической техники и народного хозяйства // Титан. 1993. № 4. С. 70—75.

В. В. КОЗЛОВ, инж.
(ООО "Томсктрансгаз"),
И. В. ТРЕТЬЯКОВ, инж.
(ФГУП "ПО "Севмаш")

Устранение магнитного дутья постоянными магнитами при ремонте магистральных газопроводов

Для устранения магнитного дутья широко применяют постоянные магниты. К преимуществам данного метода, несмотря на некоторые недостатки (ограниченную эффективность, небольшую длину участка компенсации свариваемого стыка, необходимость определенных навыков при применении), следует отнести небольшие массу и габаритные размеры применяемых магнитов, про-

стоту, невысокую стоимость по сравнению с устройствами и установками для размагничивания. При остаточной намагниченности до 100—120 мТл применение данного метода может быть очень эффективным и обеспечивать стабильно положительные результаты качества сварных соединений.

Метод устранения магнитного дутья постоянными магнитами основан на способе (приеме) ком-

пенсации магнитного поля B , создающего магнитное дутье, магнитным полем постоянного магнита B_k (рис. 1). В основе метода лежит принцип суперпозиции.

Для полной компенсации (индукция магнитного поля в сварочном зазоре равна нулю) величины B и B_k должны быть абсолютно равны.

На практике такой точности при компенсации не требуется, так как в определенном начальном диапазоне индукции магнитного поля в сварочном зазоре магнитное дутье не проявляется либо проявляется очень слабо или его можно контролировать. Магнитные поля, при которых возникает магнитное дутье, определены научными исследованиями [1, 2] и подтверждены практикой [3, 4]. Установлено, что в диапазоне значений магнитной индукции от -2 до 2 мТл проявление магнитного дутья очень слабое и не оказывает влияния на процесс сварки. Влияние магнитного дутья начинает заметно проявляться в диапазонах от -4 до -2 и от 2 до 4 мТл, однако это влияние можно устранить технологическими приемами (изменением точки подключения обратного провода, тока сварки, наклона электрода). При наличии магнитных полей в сварочном зазоре с остаточной намагниченностью более 4 или

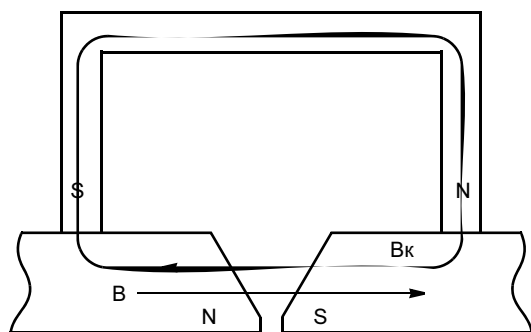


Рис. 1. Компенсация магнитного поля постоянным магнитом



Рис. 2. Шкала влияния магнитного дутья

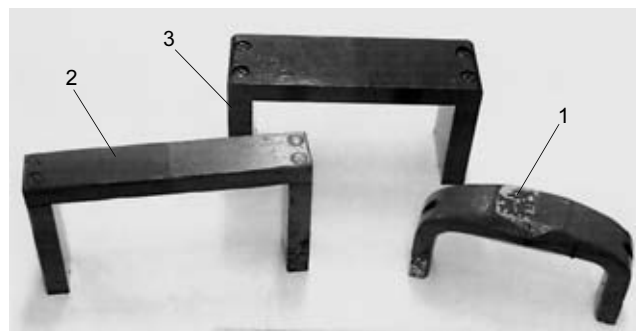


Рис. 3. Постоянные компенсационные магниты

менее -4 мТл необходимо размагнитить свариваемые детали или участок сварки (рис. 2).

Не следует, однако, воспринимать эти значения как пороговые, после которых поведение дуги резко меняется. Магнитное дутье нарастает плавно по мере увеличения магнитного поля в сварочном зазоре. А значения 2 и 4 мТл являются некоторыми принятыми, ориентировочными, при достижении которых отрицательный эффект начинает проявляться.

Для устранения магнитного дутья при ремонте участков магистральных газопроводов в ООО "Томсктрансгаз" применяют постоянные, литые, С-образные магниты (рис. 3) МКС-1М (1), постоянные П-образные магниты из деформируемого магнитного материала МКС-С (2) и МКС-С1 (3).

Основные технические характеристики постоянных магнитов приведены в таблице.

Практика устранения магнитного дутья с помощью постоянных магнитов в ООО "Томсктрансгаз" показала, что для успешного применения этого метода и облегчения его освоения сварщиками и специалистами необходима подробная и относительно простая технологическая инструкция. Инструкция в виде практических технологических рекомендаций разработана совместно ООО "Томсктрансгаз" и ФГУП "ПО "Севмаш" в рамках договорной работы.

При выполнении данных работ определены эффективность постоянных магнитов МКС-С, разработан и изготовлен усовершенствованный магнит МКС-С1, отработана методика устранения магнитного дутья при сварке стыка двумя и более сварщиками.

В связи с тем, что магнитные поля зависят от множества факторов (исходной остаточной намаг-

Магнит	Габаритные размеры магнита, мм	Сечение полюса, мм	Габаритные размеры окна магнита, мм	Масса, кг	Эффективность, мТл	Материал
МКС-1М	200 × 110 × 70	40 × 20	160 × 80	2,9	70	ЮНДКТ5
МКС-С	254 × 147 × 47	47 × 27	200 × 120	3,8	70	25Х15КА
МКС-С1	260 × 147 × 80	80 × 25	210 × 120	6,8	100	25Х15КА

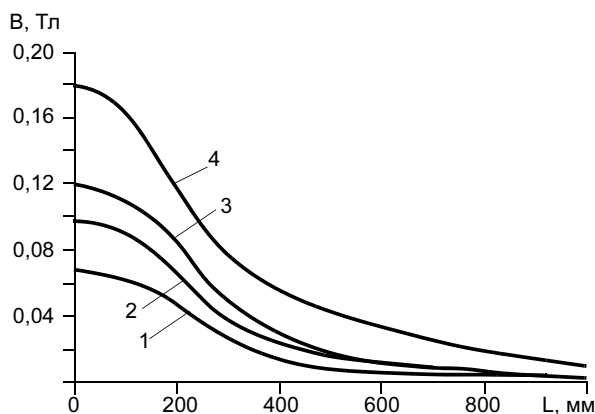


Рис. 4. Эффективность постоянных магнитов при применении по одному магниту МКС-С (1), МКС-С1 (2) и по два магнита МКС-С (3), МКС-С1 (4)

ниченности, геометрических параметров разделки, тщательности обработки сварочной разделки и т. п.) при разработке данных рекомендаций учитывали среднестатистические показатели и значения, а за постоянные величины были приняты толщина стенки, стыковой зазор, V-образная форма разделки кромок, класс прочности стали К52-60.

Следует отметить, что эффективность постоянных магнитов является одной из главных характеристик компенсационного магнита. Эффективность определяет, какое по величине магнитное поле B , на каком расстоянии L можно компенсировать магнитом данного типа. На рис. 4 приведена эффективность магнитов МКС-1М, МКС-С и МКС-С1, установленных поодиночке и парами на стыке труб, собранных под сварку с зазором 3,5 мм (эффективности магнитов МКС-1М и МКС-С одинаковы, поэтому на рис. 4 приведены данные только для магнита МКС-С).

В качестве примера влияния многих факторов и условий на контроль и компенсацию остаточных полей можно привести зависимость индукции магнитного поля от величины зазора.

В результате проведенных испытательных работ разработаны технологические рекомендации

устранения магнитного дутья постоянными магнитами, определяющие порядок подготовительных и сварочных операций при сварке стыков труб с остаточными магнитными полями. При этом представлены варианты операционных циклов с применением одного магнита и комплектов из двух и четырех магнитов (рис. 5).

Ниже приведена последовательность операций и технологических приемов при компенсации магнитного дутья.

1. На собранном стыке проводят контроль магнитной индукции в сварочном зазоре и рядом с разделкой отмечают (можно мелом) величину и знак намагниченности. Если зафиксирована индукция остаточного магнитного поля, не превышающая 100—120 мТл, такую намагниченность устраняют с помощью постоянных магнитов.

2. По графику эффективности магнитов (см. рис. 4) и величине индукции, измеренной в зазоре стыка труб, определяют марку, число применяемых магнитов и расстояние L , на котором необходимо их установить.

3. Магнит(ы) устанавливают перпендикулярно собранному стыку (поверх наружного звенного центра) и определяют участок для нанесения прихваток корневого шва (см. рис. 5, а). Если необходимо поставить два магнита, их ставят в непосредственной близости друг от друга для увеличения эффективности. Магнит(ы) необходимо сориентировать так, чтобы полюс магнита синего цвета N был установлен на метку с отрицательной исходной намагниченностью, а полюс красного цвета S — на метку с положительной намагниченностью (см. рис. 1, 5).

4. При выборе марки магнита и их числа рекомендуется исходить из того, чтобы расстояние от места установки до места сварки составляло 200—400 мм.

5. После установки магнита вновь контролируют индукцию магнитного поля в сварочном зазоре. Индукция магнитного поля в районе предполагаемой сварки на протяжении 25—40 мм должна

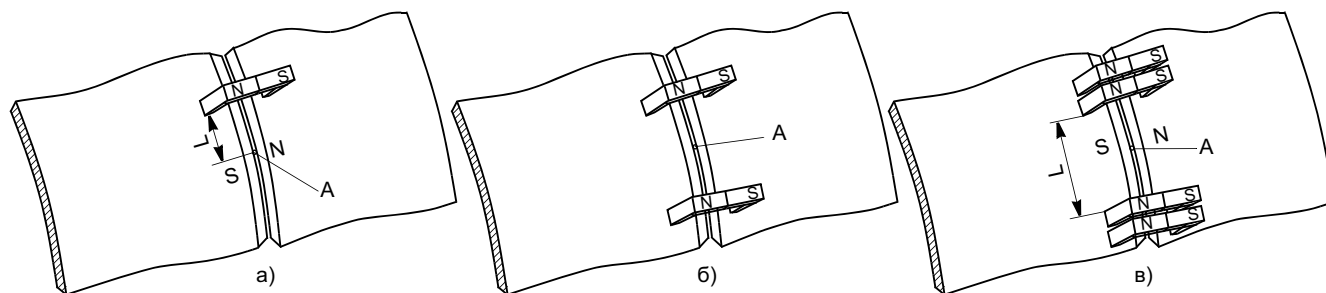


Рис. 5. Схема установки одного (а), двух, симметрично отстоящих от зоны сварки (б) и расположенных попарно, симметрично от зоны сварки (в) постоянных компенсационных магнитов (А — зона сварки)

уменьшиться до приемлемых норм ± 2 — ± 4 мТл. Перемещением магнита(ов) к месту сварки доводят магнитное поле в сварочном зазоре до нормы и сваривают участок корневого шва. Если индукция магнитного поля увеличилась и изменила знак на противоположный, значит произошла перекомпенсация и необходимо постепенно (с шагом 20—40 мм) перемещать магнит дальше от места сварки. В небольших пределах индукцию можно регулировать, поворачивая магнит вокруг оси, перпендикулярной плоскости свариваемых деталей.

Если магнитное поле в сварочном зазоре после установки магнита увеличилось без изменения знака, значит, постоянный магнит установлен неправильно, его необходимо перевернуть на 180° . После выполнения сварки на скомпенсированном участке стыка необходимо вновь проконтролировать магнитную индукцию в зазоре на смежном участке и вновь выставить компенсационный магнит(ы). Таким образом, постепенно компенсируя повышенную намагниченность по периметру сварного стыка, производят сварку.

В ряде случаев установить два магнита рядом не представляется возможным, поэтому магниты устанавливают симметрично от зоны сварки (см. рис. 5, б). Расстояние между магнитами L определяют по графику на рис. 6. Для вычисления расстояния от каждого магнита до зоны предполагаемой сварки L следует поделить пополам.

Для регулировки индукции в зоне сварки магниты так же, как в предыдущем случае, поочередно приближают или удаляют от зоны сварки с шагом 20—40 мм.

Следует также обратить внимание на то, что при выполнении сварки с использованием постоянных магнитов одновременно двумя сварщиками необходимо исключить взаимное влияние магнитов на зону сварки отдельно каждого из сварщиков. Для этого расстояние, на котором происходит компенсация магнитного поля, должно быть не менее 1000—1200 мм.

Если индукция магнитного поля в сварочном зазоре превышает 150 мТл, то такую намагниченность следует устранять с помощью обмотки с током одним из методов, приведенных в работах [5—7].

Применение приведенной методики устранения магнитного дутья в ООО "Томсктрансгаз" положительно сказалось на качестве сварных швов (снизился брак, вызванный непроварами и порами)

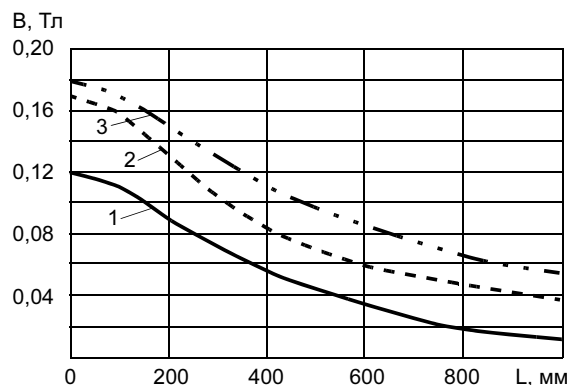


Рис. 6. Эффективность компенсационных магнитов, расположенных симметрично зоне сварки: 1 — по одному магниту МКС-1М; 2 — по два магнита МКС-С; 3 — по два магнита МКС-1С

и производительности труда при сварке намагниченных труб.

При ремонте магистральных газопроводов из труб диаметром 1020—1220 мм с остаточной намагниченностью магнитное дутье эффективно устраняется постоянными магнитами при магнитной индукции в сварочном зазоре до 100—120 мТл.

Для устранения магнитного дутья наиболее эффективно применять технологические комплекты, включающие два магнита МКС-С1 или четыре магнита МКС-С и магнитометр (индикатор магнитного дутья).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов А. П., Пак К., Рубцов Н. Н. Влияние магнитных полей на качество сварных соединений конструкций из низколегированной стали // Сварочное производство. 1977. № 10. С. 16—18.
2. Рихтер Ф., Золтер У. К вопросу размагничивания бесшовных и сварных труб, листов и полос из ферромагнитной стали // Сварка и резка. 1971. № 10.
3. Корольков П. М. Природа возникновения и методы устранения магнитного дутья при сварке // Сварочное производство. 1998. № 5. С. 6—8.
4. Blakeley P. J. Magnetic arc blow — causes and remedies // Welding & Metal Fabrication. 1991. N 8—9. P. 401—404.
5. Козлов В. В. Размагничивание стыков труб при ремонтной сварке трубопроводов // Сварочное производство. 1999. № 3. С. 42—44.
6. Современные методы размагничивания при сварке газопроводов / В. Н. Дедешко, А. И. Рыбаков, Е. В. Лопатин и др. // Сварочное производство. 2000. № 1. С. 33—37.
7. Стефанский В. А., Шаньгин А. М., Третьяков И. В. Способы размагничивания трубопроводов и опыт их применения в газовой отрасли // Сварочное производство. 2004. № 1. С. 35—41.

Т. В. АЛШЕЕВА, студентка, А. А. КОТЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук
Курский государственный технический университет

Роботизированное производство сварных ферм для мачтовых сооружений

При сооружении радиомачт, радиобашен, буровых вышек и ряда других конструкций широко используют трубчатые элементы, которые хорошо работают на сжатие и кручение. Применение труб во многих случаях позволяет снизить массу конструкции на 25—50 %, однако их соединение в узле как непосредственно, так и с помощью фасонки оказывается весьма трудоемким. Решетчатые конструкции обычно изготавливают с применением ручного труда и простейших приспособлений.

Снижение трудоемкости и повышение качества решетчатых трубных конструкций достигаются применением роботизированных технологических комплексов (РТК).

В данной работе поставленная задача решена путем создания автоматической сборочно-сварочной линии для производства ферм мачтовых соору-

жений (рис. 1) длиной до 6 м и высотой до 1,2 м с конструктивными элементами, изготовленными из многосортаментных трубчатых элементов.

Линия (рис. 2) состоит из роликового конвейера 1, пульта управления 2, универсального станда для сборки и прихватки решетчатых металлоконструкций 3, модуля автоматической сборки двух одновременно работающих промышленных роботов РМ-01 для сварки раскосов и стоек с поясами.

Модуль автоматической сборки включает два магазина-питателя поясов ферм 4, магазины-питатели раскосов 5 и стоек 6, промышленный робот РМ-01 7, порталный манипулятор 8. Точное перемещение универсального станда при сборке и прихватке обеспечивается от привода через зубчатую передачу и шариковинтовую пару. Подача раскосов и стоек к месту схвата манипулятора производится в ориентированном относительно обработанных торцов положении.

Два пояса по одному из каждого магазина подаются по наклонному лотку к точке захвата отсекающего устройства и затем в ложементы универсального станда. Пояса, раскосы и стойки фиксируются в требуемом положении относительно друг друга с помощью ложементов универсального станда.

После фиксации элементов фермы производится прихватка раскосов и стоек к двум поясам с помощью автоматической сварки в CO_2 промышленным роботом РМ-01. При этом каждый раскос и стойка прихватываются к каждому из поясов в двух точках. Перемещение универсального станда от одного узла к другому с заданной скоростью осуществляется по программе ЭВМ челночным транспортом 9.

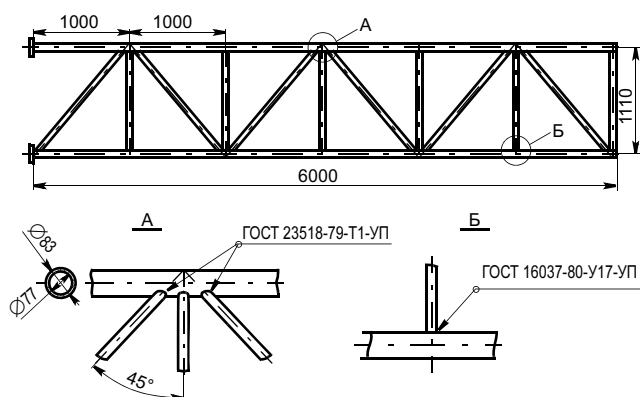


Рис. 1. Ферма мачтового сооружения

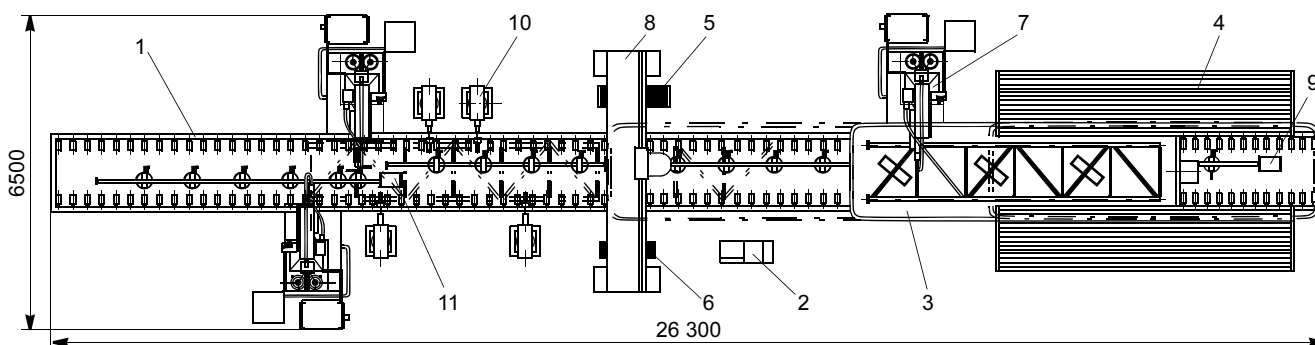


Рис. 2. Автоматическая сборочно-сварочная линия для производства ферм мачтовых сооружений

После сборки и прихватки универсальный стенд перемещается транспортером на позицию для разгрузки фермы и последующей сварки. По команде от ЭВМ включаются нагреватели биметаллических подъемников универсального стенда, в результате срабатывания подъемников ферма поднимается из ложементов стенда и фиксируется захватами кантователя штучных грузов 10.

По команде от ЭВМ включается привод челночного транспортера 11 и осуществляется захват крайней стойки фермы вилочным захватом транспортера. При включении вертикальных пневмоцилиндров кантователя ферма укладывается на ролики конвейера (захваты раскрепляются срабатыванием горизонтальных пневмоцилиндров кантователя).

Челночным транспортером ферма подается на одновременную приварку раскосов и стоек к поясам (узел фермы) парой роботов РМ-01. После завершения сварки одного узла ферма перемещается транспортером на шаг между узлами фермы с целью введения в рабочую зону этих же роботов следующего узла фермы для его сварки.

После приварки всех раскосов и стоек с одной стороны фермы челночный транспортер возвращает сваренную конструкцию на позицию кантовки, где ферма кантуется кантователем штучных грузов на 180° и процесс сварки всех раскосов и стоек с противоположной стороны повторяется.

Большие размеры ферм, сложная форма линии соединения, погрешности изготовления раскосов, стоек и поясов, а также погрешности их сборки под сварку затрудняют применение автоматической сварки.

Автоматизация сварки ферм практически возможна только с помощью роботов, оснащенных сенсорными устройствами, обеспечивающими автоматическую корректировку траектории сварочной горелки в зависимости от фактического положения свариваемых элементов в рабочем пространстве.

При оснащении роботов системой адаптации применена прямая горелка. Видеосенсорное устройство (рис. 3) состоит из экрана 1, который хомутом 2 закрепляется на сварочной горелке 3. На хомуте установлена также фотоприемная камера 4, состоящая из фотоприемника 5, интерференционного фильтра 6, объектива 7 и сменного входного окна 8.

При движении электрода 9 по средней линии вдоль стыка 10 излучение от дуги проходит через щель между экраном и свариваемым изделием 11, отражается от его поверхности и попадает на фотоприемную камеру, проходя через сменное входное окно, объектив, интерференционный фильтр и фотоприемник. При этом производится анализ

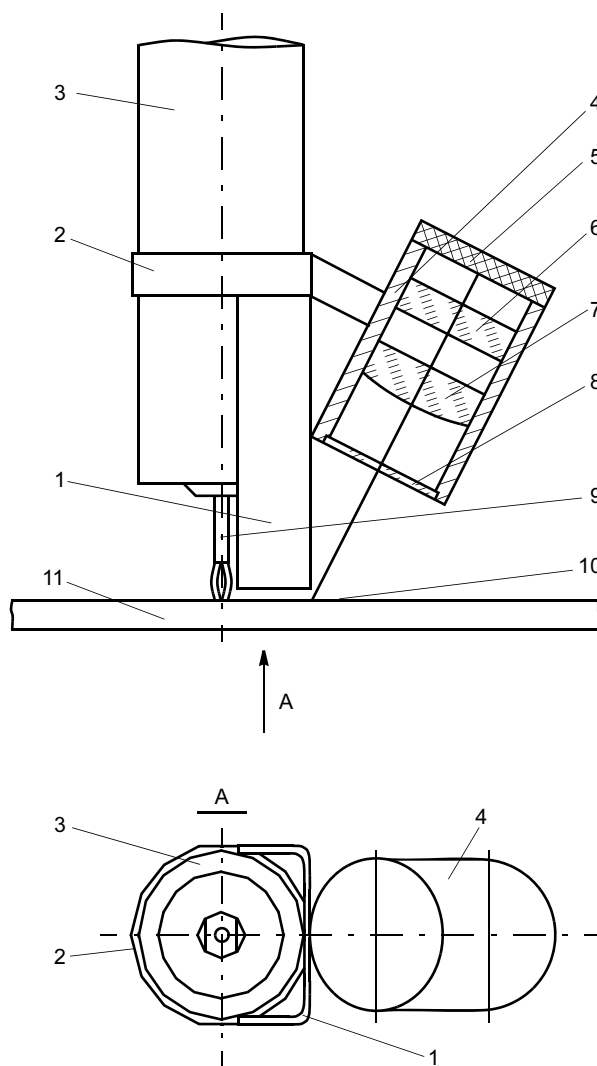


Рис. 3. Видеосенсорное устройство

формы стыка перед сваркой и сравнение с эталоном. При недопустимых отклонениях на соответствующие приводы робота поступает команда от ЭВМ для коррекции траектории электрода.

Применение автоматической сборки поясов с раскосами и стойками и прихватки ферм, роботизированной сварки рабочих швов, автоматической кантовки и транспортировки ферм между сборочными и сварочными позициями позволяет значительно сократить число рабочих-сварщиков, улучшить условия труда и повысить качество продукции.

Обслуживание линии предусмотрено всего двумя операторами в смену: одним на позиции сборки ферм (для загрузки магазинов-питателей и наблюдения за работой модуля автоматической сварки) и одним на позиции сварки роботами (для наблюдения за работой роботов и их периферийного оборудования).

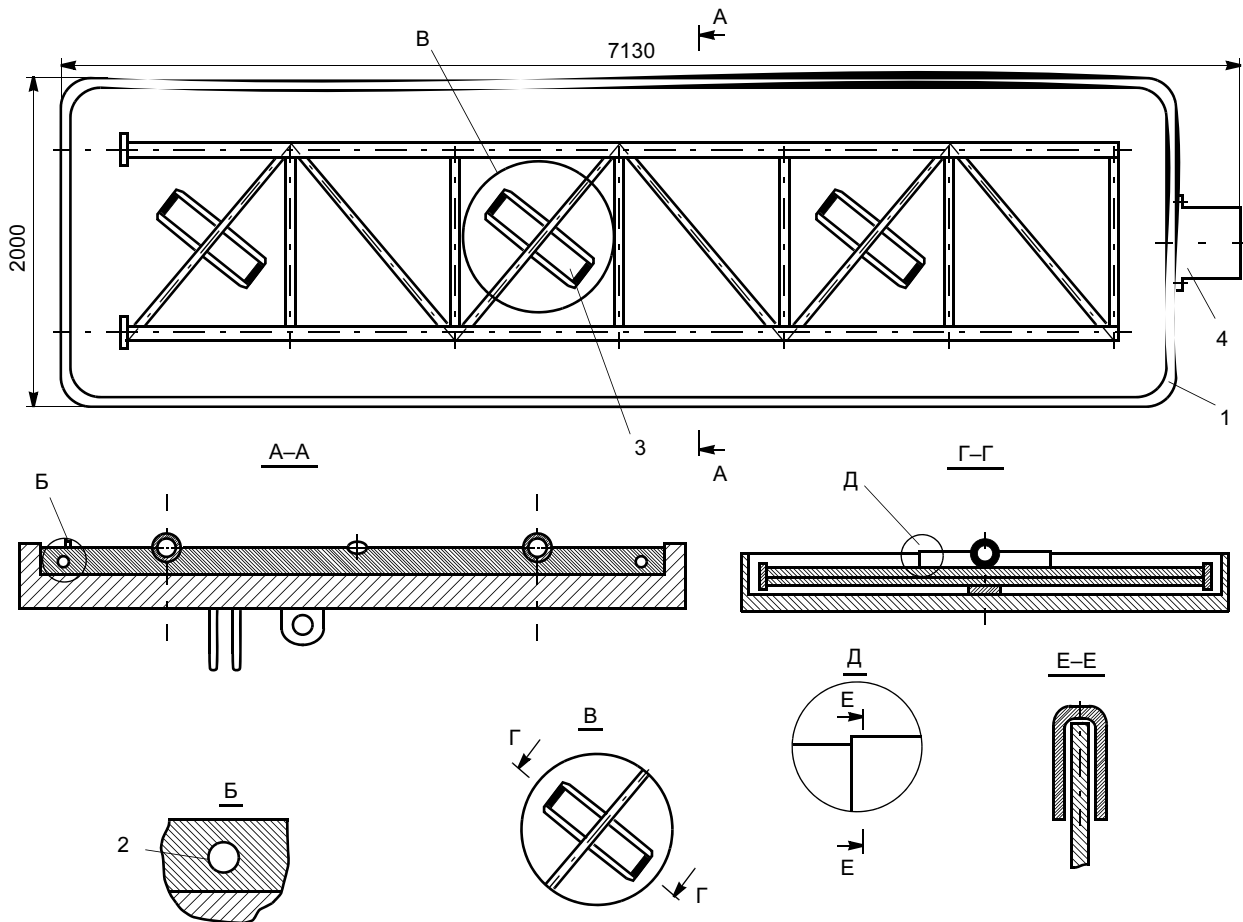


Рис. 4. Универсальный стенд для сборки плоских решетчатых металлоконструкций

Производительность линии — 50 ферм в смену.

Для перехода на выпуск ферм других типоразмеров необходимо заменить управляющую программу и провести настройку универсального стенда (рис. 4) для сборки и прихватки новой конструкции изделия. Настройка универсального стенда производится в следующей последовательности. При помощи нагревательного элемента 2 поддон 1, заполненный легкоплавким металлом, нагревают до температуры плавления легкоплавкого металла; собранный образец решетчатой металлоконструкции помещают в поддон с расплавленным металлом, затем нагрев прекращают. После затвердевания легкоплавкого металла решетчатую конструкцию извлекают из поддона. Для этого включают нагреватели подъемного устройства 3. При этом происходит нагрев биметаллических пластин, которые деформируются за счет различных значений температурных коэффициентов линейного расширения металлов, и приподнимают решетчатую металлоконструкцию над затвердевшим легкоплавким металлом. В результате легкоплавкий металл

принимает форму (рельеф) металлоконструкции. Затем с помощью полученной формы собирают и прихватывают остальные изделия данного типоразмера.

ВЫВОД

Разработанная автоматическая сборочно-сварочная линия позволяет повысить точность взаимозависимых параметров технологического процесса роботизированной сварки многосортных трубчатых элементов мачтовых сооружений, значительно сократить число рабочих-сварщиков, улучшить условия труда и повысить качество продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алпеева Т. В., Котельников А. А. Технологическое оборудование и оснастка в составе РТК сборки и сварки крупногабаритных узлов // Сварочное производство. 2006. № 4. С. 33—35.
2. Патон Б. Е., Лобанов Л. М. Роботизированное производство сварных ферм для перекрытий промышленных зданий // Автоматическая сварка. 1994. № 12. С. 26—29.

В. В. МОРОЗОВ, д-р техн. наук
(Владимирский государственный университет),
В. Н. ОЛЕЙНИКОВ, аспирант
(ООО "КлиматВентМаш", г. Владимир)

Изучение упрочняющего механизма ионно-имплантированных сталей У8А, Х12М и Р6М5

Упрочнение материала — это повышение его сопротивления пластической деформации и разрушению под действием внешних нагрузок. Поскольку пластическая деформация обычно связана с двумерным движением структурных дефектов — дислокаций, то физическое понимание явления упрочнения состоит в выяснении механизмов затруднения этих перемещений [1]. Одним из наиболее перспективных способов упрочнения поверхностных слоев и повышения эксплуатационных свойств материалов является модификация поверхности методом ионной имплантации, которую в настоящее время все более широко применяют в машиностроении.

Исследовали образцы из сталей У8А, Х12М и Р6М5 в исходном состоянии, после закалки и облучения полиэнергетическим пучком ионов Ag^+ (средняя энергия 10 кэВ, доза облучения $0,7 \cdot 10^8$ ион/см²) [2] и легированных атомами Al методом ионного перемешивания. Для этого перед облучением на поверхность части отожженных образцов методом термического испарения в вакууме ($p < 1 \cdot 10^{-5}$ Па) напылением наносили алюминиевые пленки толщиной 50—70 нм. В процессе облучения часть атомов пленки внедрялась в приповерхностный слой материала, т. е. происходил процесс ионного перемешивания [1]. Износостойкость исследова-

ли на установке "Фрикцион-1МА" при следующих режимах: скорость вращения предметного столика 33 об/мин, пара трения плоскость—сфера, диаметр сферы $r = 1$ мм, нагрузка на индентор 1,1 Н, тип трения — сухой, максимальное биение образца ± 5 мкм. Износостойкость материала оценивали по изменению силы трения от времени и глубины дорожки. Для изучения структуры дорожки использовали оптическую микроскопию. Силу трения измеряли на приборе через каждые 150 с.

Измерения микротвердости образцов проводили на микротвердомере ПМТ-3. Индентор вводили в образец с выдержкой не менее 30 с. Микротвердость рассчитывали по формуле

$$H_{\mu} = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \alpha / 2}{d^2 c^2}, \quad (1)$$

где P — нагрузка на индентор, Н;

d — диагональ отпечатка, мкм;
 c — коэффициент, мкм/дел.

Значение микротвердости H_{μ} — среднеарифметическое по результатам измерения 20 образцов. Микротвердость образцов после испытания определяли в пределах дорожки трения.

Выявлено повышение микротвердости у всех образцов из сталей, облученных Ag^+ и легированных Al, по сравнению с образцами в исходном состоянии и после закалки за счет упрочненного слоя материала (рис. 1).

Получены ПЭМ-микротографии, на которых видно изменение микроструктуры у образцов, из сталей после закалки и облучения Ag^+ и легированных Al, по сравнению с образцами из сталей в исходном состоянии и после закалки (рис. 2).

Об упрочнении поверхностного слоя ионно-имплантируемых сталей свидетельствует и увели-

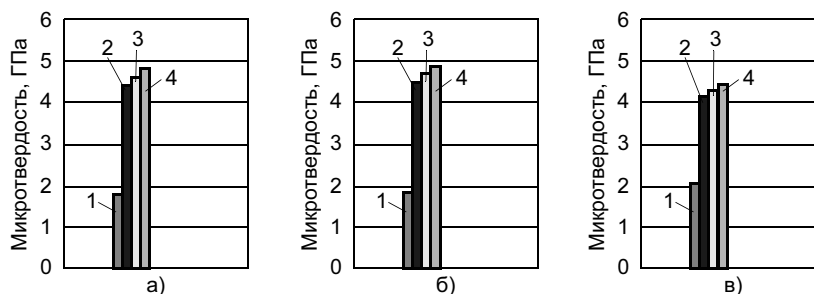


Рис. 1. Микротвердость образцов из сталей Х12М (а), Р6М5 (б) и У8А (в): 1 — исходное состояние; 2 — после закалки; 3 — после облучения; 4 — легирование Al

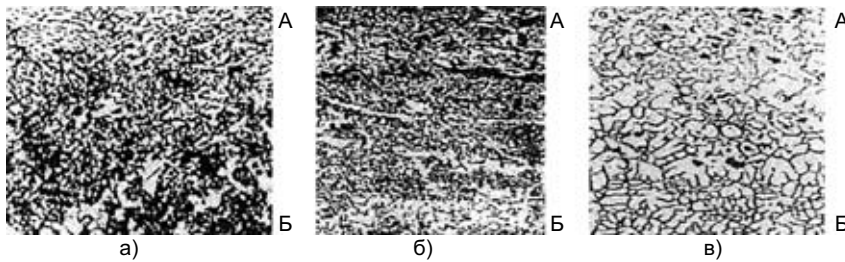


Рис. 2. Микроструктура сталей У8А (а. $\times 400$), Х12М (б. $\times 400$) и Р6М5 (в. $\times 300$) (А — облучение Ag^+ и легирование Al; Б — исходное состояние)

чение износостойкости поверхности. Для подтверждения данного предположения измеряли силу трения и объемный износ сталей У8А, Х12М и Р6М5.

Выявлено уменьшение силы трения у образцов из сталей легированных Al и облученных Ag^+ , по сравнению с исходными и закаленными образцами: для стали Х12М — исходный образец на

47,5 % и закаленный — на 15,1 %; для стали Р6М5 — исходный образец на 56,5 % и закаленный — на 24,3 %; для стали У8А — исходный образец на 1,32 % и закаленный — на 9,7 %.

Наблюдается уменьшение объемного износа у сталей, легированных Al и облученных Ag^+ , по сравнению с исходными и закаленными образцами: для стали

Х12М — исходный образец в 9,8 раз и закаленный — в 2,8 раза; для стали Р6М5 — исходный образец в 10,4 раза и закаленный — в 2,6 раз; для стали У8А — исходный образец в 10,3 раза и закаленный — в 4,6 раз.

Таким образом, у сталей, облученных Ag^+ и легированных Al, появляется более износостойкий поверхностный слой за счет упрочнения, а также уменьшение размеров зерен, что соответствует увеличению площади межзеренных границ, препятствующих движению дислокаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. М.: Металлургия, 1990. 216 с.
2. Волков Н. В., Калинин Б. А. Материаловедческие вопросы атомной техники. 1991. 64 с.

Б. Л. ГОЛОВИЗНИН, инж., А. В. МАСАЛКОВ, инж., А. Ф. КОНОНСКИЙ, инж.,
С. А. ПОНОМАРЕВ, инж., В. А. КОРОТКОВ, д-р техн. наук
ФГУП "ПО "Уралвагонзавод"

Совершенствование технологии износостойкой наплавки деталей автосцепного устройства грузовых вагонов на ФГУП "ПО "Уралвагонзавод"

В 2003 г. в рамках программы создания вагонов нового поколения с увеличенным ресурсом работы на Уралвагонзаводе была внедрена износостойкая наплавка деталей автосцепки. Наплавку производили способом механи-

зированной дуговой сварки в защитном газе. Основной металл корпуса автосцепки — сталь 20ГЛ, замка — 20ФЛ. В качестве наплавочного материала применяли сплошную стальную проволоку Св-12Х15Г2 диаметром 1,4 мм.

В качестве защитного газа использовали аргон первого сорта. Наплавляли тяговые поверхности большого 1 и малого 2 зубьев корпуса автосцепки и замыкающую поверхность замка 3 в один слой толщиной 3 мм (рис. 1). Твердость наплавки (400—500 НВ) по сравнению с твердостью основного металла (около 190 НВ) обеспечивает увеличение ресурса работы деталей минимум в 3 раза.

Внедрению наплавки предшествовал большой объем опытно-исследовательских работ, включающий пробеговые испытания опытной партии деталей на Экспериментальном кольце Всероссийского научно-исследователь-

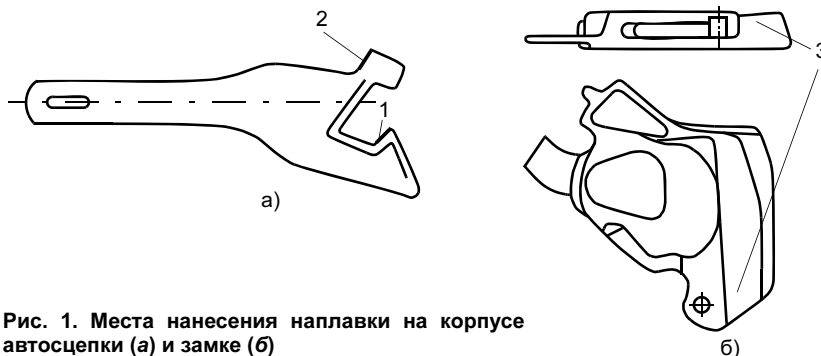


Рис. 1. Места нанесения наплавки на корпусе автосцепки (а) и замке (б)

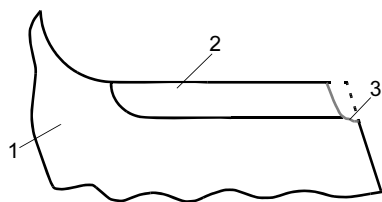


Рис. 2. Повреждение малого зуба корпуса автосцепки: 1 — основной металл; 2 — наплавленный слой; 3 — поврежденный участок

ского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ).

Однако, несмотря на положительные результаты исследований и испытаний, приблизительно через год эксплуатации были выявлены повреждения наплавленного слоя. При анализе установили, что повреждения происходят только на острой кромке малого зуба корпуса автосцепки путем скалывания острой кромки с вырывом основного металла при нагрузках, возникающих в процессе движения состава. Поверхность излома имеет характерный усталостный вид (рис. 2).

Причина повреждения заключается в следующем. В условиях эксплуатации кромка малого зуба, имеющая малый радиус скругления 3 мм, испытывает большие удельные нагрузки в процессе движения по колею с малым радиусом поворота, которые не компенсируются деформацией вследствие высокой твердости наплавки (400—500 НВ). При равных условиях эксплуатации, но большем радиусе скругления кромки $R =$

$= 10$ мм, большой зуб корпуса автосцепки с твердой наплавкой работает идеально, так как удельные нагрузки не превышают критической величины.

Для решения возникших проблем изменили требования к качеству подготовки деталей автосцепки по объему недопустимых дефектов и чистоте поверхности под наплавку, раскладку и последовательность наложения наплавочных валиков, ввели ряд конструкторских и технологических изменений, провели опытно-исследовательские работы по изучению структур и механических свойств наплавленного металла, ЗТВ и основного металла и сравнительные ударные испытания на стенде-горке автосцепок с экспериментальными деталями с наплавкой по серийной технологии и с расширенным объемом наплавки (тяговых и ударных поверхностей) и "мягкими" окантовочными валиками (Св-08Г2С, ПП-АН180М), а также с литым буртом по кромке малого зуба.

Исследования макро- и микроструктуры проводили на четырех вариантах замков, отличающихся материалами, применяемыми для окантовочных валиков (табл. 1).

Для проведения ударных испытаний на стенде-горке и последующих металлографических исследований выполняли наплавку замков трех комплектов автосцепок "корпус и замок" (табл. 2).

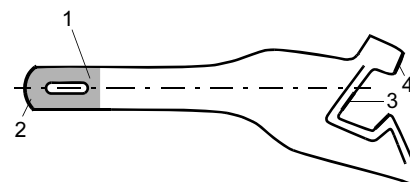


Рис. 3. Места наплавки: 1, 2 — трущаяся и ударная поверхности хвостовика соответственно; 3, 4 — ударная поверхность зева и малого зуба соответственно

Места наплавки ударных поверхностей корпуса автосцепки и трущейся поверхности хвостовика показаны на рис. 3.

Подготовку поверхностей деталей автосцепок под наплавку проводили по серийной технологии — прослаблением в литье с последующей дробеочисткой и выборочной шлифовкой от остатков пригара.

Для снижения остаточных напряжений в наплавленном металле кромки и физико-химической неоднородности в ЗТВ разработали схемы раскладки и последовательности наложения валиков для каждой наплавляемой поверхности. На рис. 4 приведена

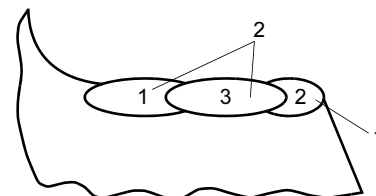


Рис. 4. Последовательность наложения валиков при наплавке: 1 — окантовочный валик; 2 — наплавочные валики

Таблица 1

Номер замка	Материал окантовочного валика, диаметр, мм	Защитный газ
1	Св-08Г2С, 1,4	CO ₂
2	ПП-АН180М, 2,0	CO ₂
3	Св-12Х15Г2, 1,4 (наплавка по серийной технологии)	Ar
4	ПП-СП10, 2,8	CO ₂

Таблица 2

Номер комплекта	Материал окантовочных валиков замков и корпусов автосцепок	Защитный газ	Примечание
1	Св-12Х15Г2 (наплавка по серийной технологии)	Ar	Детали наплавлены по серийной технологии с учетом изменений, ужесточающих требования к подготовке поверхностей под наплавку, порядку наложения наплавочных валиков и качеству наплавленных поверхностей
2	Св-08Г2С	CO ₂	
3	ПП-АН180М		

Таблица 3

Номер образца (см. табл. 1)	Зона сварного соединения образца наплавки	Микроструктура	Твердость	
			поверхности, НВ	в сечении, HRC
1	Наплавленный металл Св-12Х15Г2	Тростомартенсит	400—415	41—47
	Наплавленный металл Св-08Г2С (окантовочный валик)	Сорбитообразный перлит и феррит столбчатого строения	207—229	10—19
	ЗТВ в основном металле 20ФЛ	Сорбит и феррит в виде скоплений, игл (балл зерна от наплавки в основной металл — от 4 до 7, ГОСТ 5639—82), далее мелкие зерна перлита и феррита (балл 10, ГОСТ 5639—82)	—	12—25
	Основной металл 20ФЛ	Сорбит и феррит в виде сетки, скоплений и игл	—	12—19
2	Наплавленный металл Св-12Х15Г2	Тростомартенсит	401—444	43—48
	Наплавленный металл ПП-АН180М (окантовочный валик)	Сорбит и феррит дендритного строения	255—363	28—34
	ЗТВ в основном металле 20ФЛ	Сорбит и феррит в виде скоплений игл по крупному зерну (балл 4—8, ГОСТ 5639—82), далее мелкие зерна перлита и феррита (балл 10, ГОСТ 5639—82)	—	16—33
	Основной металл 20ФЛ	Сорбит и феррит в виде сетки, скоплений и игл	—	15—19
3	Наплавленный металл Св-12Х15Г2	Тростомартенсит	415—444	40—48
	ЗТВ в основном металле 20ФЛ	Сорбит и феррит в виде скоплений игл по крупному зерну (балл 4—8, ГОСТ 5639—82), далее мелкие зерна перлита и феррита (балл 10, ГОСТ 5639—82)	—	14—26
	Основной металл 20ФЛ	Сорбит и феррит в виде сетки, скоплений и игл	—	12—20
4	Наплавленный металл Св-12Х15Г2	Тростомартенсит	444	42—53
	Наплавленный металл ПП-СП10 (окантовочный валик)	Сорбитообразный перлит и феррит дендритного строения	229	23—25
	ЗТВ в основном металле 20ФЛ	Сорбитообразный перлит и феррит в виде скоплений игл, далее мелкозернистый перлит и феррит	—	15—38
	Основной металл 20ФЛ	Сорбит и феррит в виде сетки, скоплений и игл	—	16—25

схема наплавки тяговой поверхности малого зуба. Принятая последовательность наложения валиков обеспечивает предварительный подогрев кромки при наложении первого валика и частичный отпуск крайнего валика заключительным.

Режимы наплавки приведены ниже.

Режим наплавки проволокой Св-12Х15Г2: $d_{пр} = 1,4$ мм; $I_{св} =$

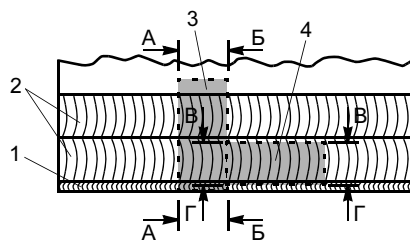


Рис. 5. Схема вырезки темплетов для металлографических исследований (А—А, Б—Б, В—В, Г—Г — исследуемые сечения): 1, 2 — см. рис. 4; 3, 4 — поперечный и продольный темплеты

$= 260 \div 310$ А (постоянный обратной полярности); $U_d = 30 \div 32$ В; $Q(Ar) = 20 \div 22$ л/мин; вылет электродной проволоки 15—25 мм.

Режим наплавки окантовочного валика проволокой ПП-АН180М: $d_{пр} = 2,0$ мм; $I_{св} = 240 \div 290$ А (постоянный обратной полярности); $U_d = 24 \div 28$ В; $Q(CO_2) = 8 \div 10$ л/мин.

Для наплавки применяли полуавтоматы с четырехроликовыми механизмами подачи проволо-

ки ПДГО-527 в комплекте с источниками питания ВДУ-506.

При макроисследованиях установлено отсутствие в наплавленном металле недопустимых внутренних дефектов.

Пример схемы вырезки темплетов для тяговой поверхности малого зуба корпуса автосцепки приведен на рис. 5. Для исследований микроструктуры темплеты вырезали из каждой наплавленной поверхности каждой детали аналогично приведенной схеме.

Результаты исследований микроструктуры и замеров твердости образцов наплавки приведены в табл. 3.

Ударные испытания на стенде-горке проводили следующим образом. Автосцепку устанавливали на вагон-боек. Силу удара определяли с помощью предварительно протарированной автосцепки-динамометра, установленной на испытуемом вагоне. В соответствии с условиями программы ресурсные испытания проводили до потери несущей способности корпуса автосцепки или до разрушения одной из наплавленных поверхностей. Автосцепки подвергали 800 базовым циклам соударений при приведенной (эквивалентной по по-

вреждающему воздействию) силе 2,2 МН. Критерий окончания ресурсных испытаний определяли из тождества

$$F^m N = \sum F_i^m n_i,$$

где F — сила, равная 2,2 МН; m — показатель степени, в соответствии с ЦВ-ЦЛ-09.11.99 "Методика испытаний автосцепок на ресурс при соударении. Стандарт ССФЖТ МПС России" принят равным 4; N — базовое число соударений, равное 800; F_i — фактическое среднее значение интервала силы удара в автосцепку при i -м соударении; i — интервал силы; n_i — количество соударений в i -м интервале сил.

В процессе проведения испытаний (после проведения каждого цикла из 100 ударов) и после их завершения проводили визуальный осмотр автосцепки и наплавленных тяговых поверхностей.

В результате осмотров дефекты не обнаружены, функциональная работоспособность автосцепок в процессе испытаний и после их завершения удовлетворительная. В процессе испытаний наблюдалось изменение радиуса скругления острой кромки малого зуба, при этом установили,

что после 400 ударов кромка, наплавленная проволокой Св-08Г2С, скруглилась с 3 до 10—15 мм. Кромки, наплавленные проволоками Св-12Х15Г2 и ПП-АН180М, после 800 циклов соударений скруглились до 5—6 мм.

После проведения испытаний на стенде-горке проводили металлографические исследования деталей автосцепок с наплавкой (см. рис. 5). При этом установили отсутствие дефектов в наплавленном слое и ОШЗ, а также структурных изменений и изменений твердости (см. табл. 3).

Таким образом, в результате экспериментальных работ, исследований и испытаний на ФГУП "ПО "Уралвагонзавод" была внедрена наплавка окантовочного валика по кромке малого зуба порошковой проволокой ПП-АН180М. Принятые меры позволили решить проблему повреждения острых кромок с упрочняющей наплавкой и обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики автосцепных устройств. В дальнейшем планируется увеличение номенклатуры упрочняемых поверхностей и деталей автосцепных устройств с учетом полученного опыта.

Вниманию специалистов!

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 20.04.2006 г. № 227 в Положение о порядке присуждения ученых степеней внесены изменения, которые существенно повышают уровень требований к материалам, выносимым на защиту докторской и кандидатской диссертаций. ВАК Минобрнауки РФ сформировал новый Перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней.

Издания, рекомендованные для публикации материалов диссертаций на соискание степени доктора наук, отмечены в Перечне звездочкой.

Доводим до Вашего сведения, что журнал "Технология машиностроения" является изданием, входящим в новый Перечень журналов, утвержденных ВАКом для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук.

Редакция

В. Д. ПЛАХТИН, д-р техн. наук, А. Н. ПАРШИН, аспирант
Московский государственный открытый университет

Синтез зацепления цилиндрических зубчатых колес с арочными бочкообразными зубьями

Цилиндрические зубчатые передачи с арочными зубьями характеризуются более высокими эксплуатационными свойствами по сравнению с обычными прямозубыми колесами: повышенной нагрузочной способностью, плавностью работы, бесшумностью, увеличенным углом перекрытия и др. Однако существующие методы синтеза арочного зацепления [1—4] относятся к зацеплению с постоянной шириной зубьев в поперечных сечениях по их длине.

Анализ арочного зацепления с постоянной шириной зубьев показал, что максимальная нагрузка на зубья возникает на угле перекрытия при образовании пятна контакта между зубьями по всей их длине (рис. 1). При этом имеет место увеличение изгибающих моментов в поперечных сечениях зубьев по мере их удаления от центрального поперечного сечения к торцам зубьев, неравномерное нагружение по длине зубьев и снижение их изгибной прочности.

В результате неравномерного нагружения и неточности изготовления пятно контакта зубьев смещается относительно их центрального поперечного сечения, что вызывает повышение контактных напряжений на торцевых участках зубьев, снижает долговечность и нагрузочную способность арочного зацепления.

Одним из эффективных путей повышения на-

грузочной способности арочных зубьев является выполнение их бочкообразными (рис. 2). У таких зубьев их ширина в поперечных сечениях уменьшается от центрального сечения к торцам зубчатого колеса.

При использовании цилиндрических колес с арочными бочкообразными зубьями обеспечивается их центрирование относительно центрального поперечного сечения, повышается равномерность нагружения зубьев по длине, снижаются контактные напряжения на торцевых участках зубьев и повышается нагрузочная способность арочного зацепления. Особенно эффективно применение колес с арочными бочкообразными зубьями вместо шевронных, так как в этом случае нагрузка на зубья по их длине распределяется равномерно. Благодаря этому уменьшается отрицательное влияние кромочного торцевого эффекта на износостойкость зацепления и повышается его нагрузочная способность.

Однако до настоящего времени методы синтеза зацепления с арочными бочкообразными зубьями отсутствуют.

Для повышения нагрузочной способности и улучшения эксплуатационных показателей разработан метод синтеза арочного зацепления с бочкообразными зубьями, основанный на определении форм линий смещения исходного контура выпуклой и вогнутой рабочих поверхностей арочного зу-

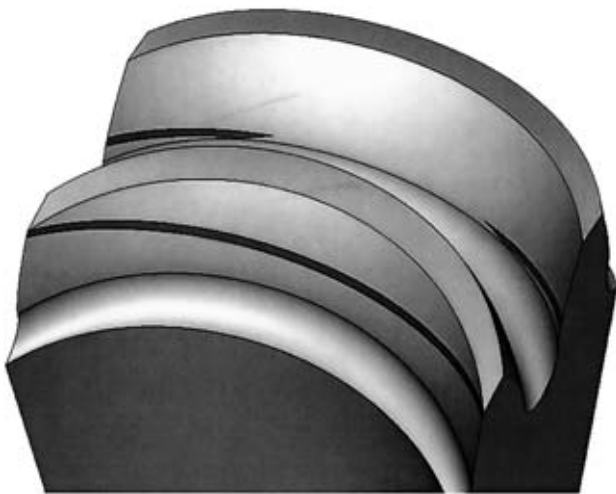


Рис. 1. Пятно контакта между арочными зубьями с постоянной шириной на вогнутых рабочих поверхностях

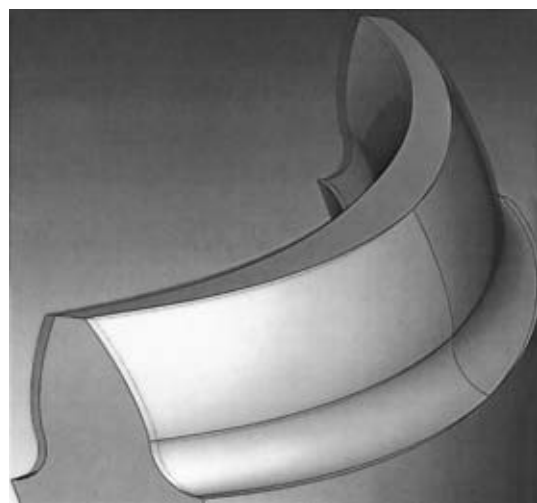


Рис. 2. Бочкообразный зуб арочного цилиндрического колеса

ба, обеспечивающих равномерное нагружение и распределение напряжений по всей длине зуба. Этот метод универсален и применим для синтеза арочного зацепления с бочкообразными зубьями различного модуля и радиуса кривизны продольного арочного профиля зубьев.

Арочные бочкообразные зубья цилиндрических колес в поперечных сечениях имеют эвольвентный профиль. Определяющим исходным параметром арочного продольного профиля бочкообразных зубьев при синтезе является задаваемый радиус дуги окружности базовой линии смещения исходного контура на развертке делительного цилиндра. Синтезируемые линии смещения исходного контура выпуклой и вогнутой рабочих поверхностей арочных зубьев в каждом поперечном сечении на развертке делительного цилиндра отклоняются от базовой на величину Δs (рис. 3). Величина Δs увеличивается от нулевого значения в центральном поперечном сечении до максимального значения на торцах зубчатого колеса. Изменение этой величины формирует синтезируемые линии смещения исходного контура, поэтому решение поставленной задачи синтеза сводится к определению значений Δs в поперечных сечениях зубьев.

Важным условием синтеза является обеспечение равномерного распределения изгибных напряжений в поперечных сечениях арочных зубьев. При расчете на изгиб арочный зуб с постоянной шириной в поперечных сечениях по всей его длине рассматривается как изогнутая консольная арочная балка с нагрузкой, распределенной по линии контакта зубьев, расположенной в плоскости зацепления. Крайние точки *A* и *B* линии контакта зубьев расположены в плоскости зацепления на окружностях их вершин в торцевых сечениях колеса (рис. 4). Такое положение линии контакта соответствует максимальному значению главного вектора распределенных сил, действующих по линии контакта в момент ее образования на всей рабочей поверхности зуба, и максимальному изгибающему моменту, действующему на зуб в его основании в каждом поперечном сечении. Основание поперечного сечения зуба принимается за опасное сечение с шириной $S_{оп}$, определяемой расстоянием между точками *K* и *L* по прямой *MN*, расположенными на окружности радиуса $r_{оп}$ начала эвольвентного профиля зуба в рассматриваемом поперечном сечении. Максимальное значение изгибающего момента в этом сечении обусловлено максимальным плечом h

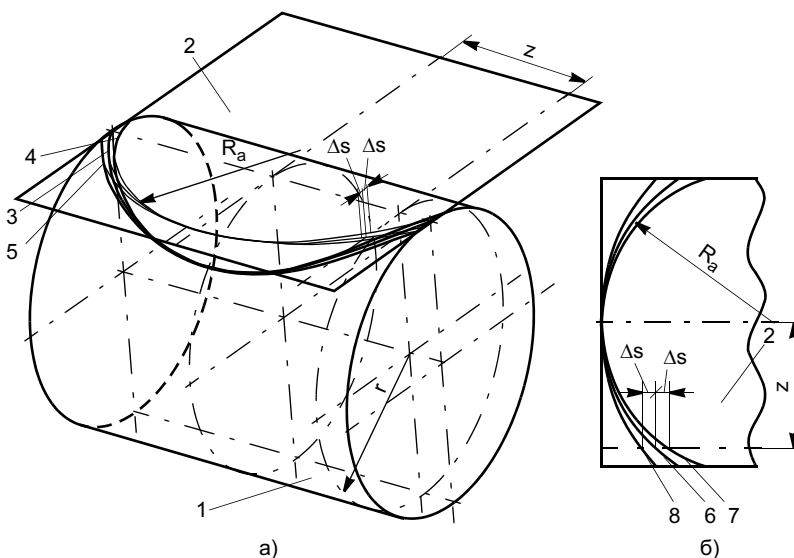


Рис. 3. Схема формирования линий смещения исходного контура для выпуклых и вогнутых поверхностей арочного зуба (а) и их положение на развертке делительного цилиндра (б): 1 — делительный цилиндр; 2 — развертка делительного цилиндра; 3 — базовая линия смещения исходного контура; 4, 5 — синтезированная линия смещения исходного контура для выпуклой и вогнутой поверхностей зуба соответственно; 6 — развертка базовой линии смещения исходного контура; 7, 8 — развертка синтезированной линии смещения исходного контура для выпуклой и вогнутой поверхностей зуба соответственно

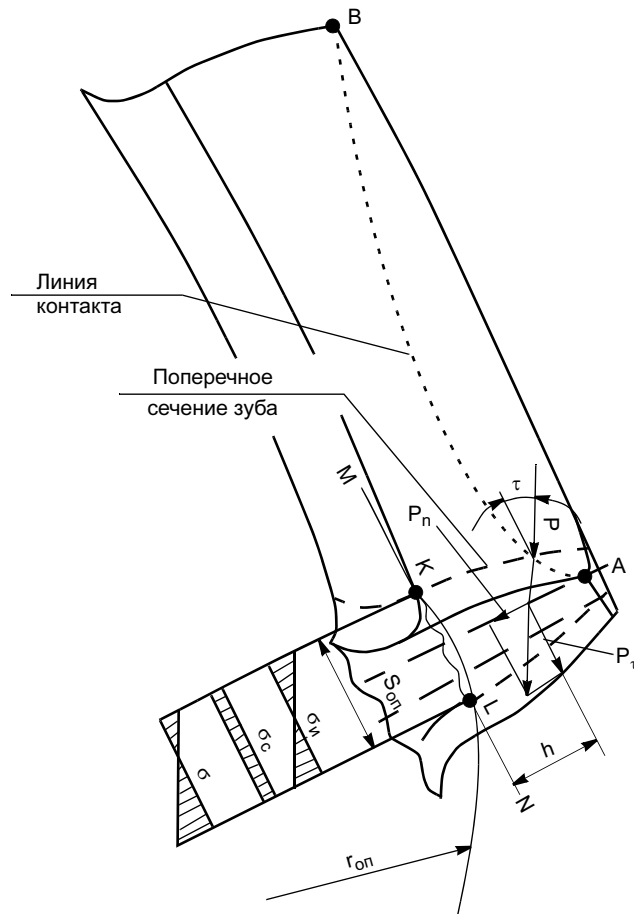


Рис. 4. Схема нагружения арочного зуба

действия тангенциальной составляющей P_τ силы P относительно опасного сечения. В других положениях линии контакта на рабочей поверхности арочного зуба в пределах угла перекрытия нагрузка на зуб будет меньше.

Решение задачи синтеза зацепления арочных бочкообразных зубьев основано на методе сечений. Метод заключается в том, что арочное зацепление по длине зубьев разбивается сечениями на интервалы, между которыми образуются элементы арочного зацепления. Число поперечных сечений, принимаемых при синтезе зацепления, определяется требуемой точностью расчета.

Элементы арочного зацепления с шириной, равной интервалу рассечения, с достаточной степенью точности можно рассматривать в виде прямозубых цилиндрических колес малой ширины, а зацепление арочных колес — в виде массива элементарных цилиндрических прямозубых колес, поперечные сечения которых параллельны центральному поперечному сечению арочного зацепления. При этом в нагруженном состоянии сумма площадей пятен контакта зацепления массива элементарных прямозубых колес принимается равной площади пятна контакта арочных зубьев. Для зацепления с бочкообразными зубьями ширина элементарного прямозубого колеса по делительному цилиндру меньше на величину $2\Delta s$, чем для зацепления арочных зубьев с постоянной шириной. Напряжения в опасном сечении для каждого элементарного прямозубого колеса можно определить из выражения [5]

$$\sigma = (\sigma_{и} - \sigma_{с})k_{\sigma} = q \left(\frac{6h \cos \tau}{bS_{оп}^2} - \frac{\sin \tau}{bS_{оп}} \right) k_{\sigma}, \quad (1)$$

где q — распределенная нагрузка, действующая на

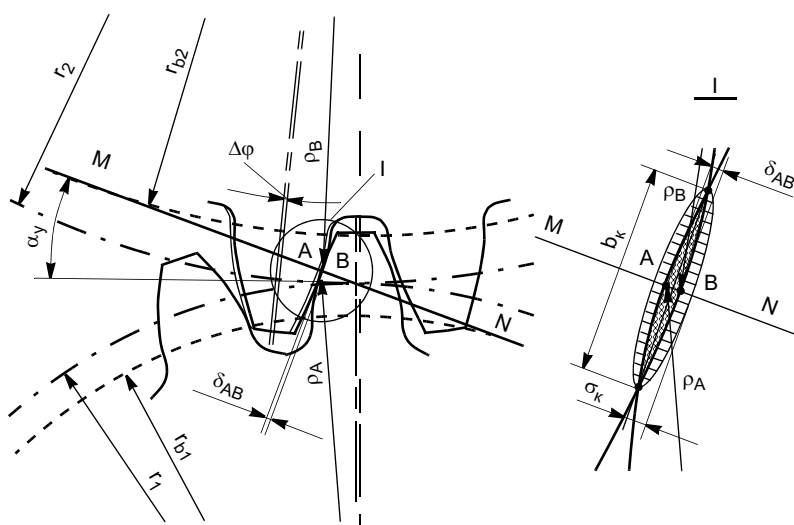


Рис. 5. Схема нагружения арочных зубьев в поперечном сечении при расчете на контактную прочность

элементарный зуб; $\sigma_{и}$ — изгибающие напряжения, вызванные тангенциальной составляющей P_τ силы P ; $\sigma_{с}$ — сжимающие напряжения, вызванные нормальной составляющей P_n силы P ; k_{σ} — теоретический коэффициент концентрации напряжений; τ — угол между направлением силы P , действующий на элементарный зуб и плоскостью опасного сечения; b — ширина элементарного прямозубого колеса.

При синтезе коэффициент k_{σ} с достаточной степенью точности может быть задан отношением площади контакта одной пары элементарных прямозубых колес к общей площади контакта зубьев арочного зацепления. Площадь пятна контакта зубьев элементарных колес между сечениями определяется из расчета их на контактную прочность.

Контактное нагружение арочных зубьев определяется по величине контактных деформаций зубьев элементарных цилиндрических прямозубых колес при передаче крутящего момента. Нагружение моделируется в поперечных сечениях величиной δ_{AB} условных пересечений рабочих поверхностей арочных зубьев, принимаемых абсолютно жесткими (рис. 5). Условное пересечение δ_{AB} определяется по величине угла $\Delta\phi$ относительного поворота зубьев колес при приложении крутящего момента, соответствующего контактной деформации зубьев.

При условном пересечении δ_{AB} угол $\Delta\phi$ принимается отрицательным и соответствует отрицательному линейному зазору в плоскости зацепления MN . Величина этого зазора для зацепления с бочкообразными зубьями определяется в поперечных сечениях с учетом отклонения линий смещения исходного контура на величину Δs от базовой (см. рис. 3).

При синтезе площадь пятна контакта зубьев арочного зацепления с бочкообразными зубьями принимается равной площади пятна контакта арочного зацепления с постоянной шириной зубьев в поперечных сечениях. При этом угол $\Delta\phi$, соответствующий условным пересечениям δ_{AB} , для синтезированного зацепления принимается больше, чем в зацеплении с постоянной шириной зубьев, так как контактные напряжения σ_k в центральном поперечном сечении у зубьев бочкообразной формы больше, чем у зубьев с постоянной шириной. Величина угла $\Delta\phi$ не должна превышать значений этого угла в зацеплении зубьев с постоянной шириной, при которых контактные напряжения σ_k в этом зацеплении будут больше допустимых при заданном крутящем моменте.

Отклонения Δs синтезируемых линий смещения от базовой определим из

условия равномерности распределения изгибных напряжений в каждом поперечном сечении арочных зубьев.

Из условия достижения равномерного изгибного нагружения арочных зубьев по длине как для выпуклой, так и вогнутой рабочих поверхностей зубьев, напряжения в опасных сечениях зубьев элементарных зубчатых колес принимают постоянными и равными напряжению в центральном поперечном сечении центрального элементарного зуба, определяемыми по формуле (1). В этом случае справедливо равенство

$$\left(\frac{6h_{\text{ц}} \cos \tau_{\text{ц}}}{S_{\text{опц}}^2} - \frac{\sin \tau_{\text{ц}}}{S_{\text{опц}}} \right) b_{\text{кц}} = \left(\frac{6h \cos \tau}{S_{\text{оп}}^2} - \frac{\sin \tau}{S_{\text{оп}}} \right) b_{\text{к}}, \quad (2)$$

где $h_{\text{ц}}$ — плечо тангенциальной составляющей P_{τ} силы P , действующей на центральный элементарный зуб по линии зацепления, относительно опасного сечения (см. рис. 4); h — то же, для сил, действующих на остальные элементарные зубья; $\tau_{\text{ц}}$, τ — углы между направлением сил, действующих на элементарные центральный и остальные зубья, и опасными сечениями; $S_{\text{опц}}$, $S_{\text{оп}}$ — ширина опасных сечений центрального и остальных элементарных зубьев; $b_{\text{кц}}$, $b_{\text{к}}$ — среднее значение ширины пятна контакта при зацеплении центрального и остальных элементарных зубьев.

Угол φ_1 между осью симметрии центрального поперечного сечения арочного зуба первого колеса с параметрами, обозначенными индексами 1, и линией центров колес $O_1 O_2$ (рис. 6, а), при котором положение линии контакта соответствует максимальному нагружению зубьев (см. рис. 4), определяется из выражения

$$\varphi_1 = \alpha_t - \alpha_y - \Delta\alpha_t - \delta_A, \quad (3)$$

где α_t — угол между радиус-вектором ρ_A точки A и радиус-вектором r_{b1} основной окружности первого колеса точки K касания с плоскостью зацепления MN ; α_y — угол профиля условной инструментальной арочной рейки; $\Delta\alpha_t$ — угол между осями симметрии торцевого и центрального сечений зуба первого колеса; δ_A — угол между осью симметрии торцевого сечения зуба и радиус-вектором ρ_A точки A .

На рис. 6 угол

$$\alpha_t = \arccos \left(\frac{r_{b1}}{r_1 + mh_a} \right), \quad (4)$$

где r_1 — радиус делительного цилиндра; m — модуль зацепления; h_a — коэффициент высоты зубьев.

Рабочая поверхность арочного зуба представляет собой поверхность, описываемую эвольвентой, расположенной в плоскости, перпендикулярной оси колеса, которая перемещается вдоль этой

оси и поворачивается относительно этой же оси. Угол $\Delta\alpha$ поворота этой плоскости, в которой расположена эвольвента, для арочных зубьев с постоянной шириной зависит от координаты z (см. рис. 3) положения рассматриваемого поперечного сечения относительно центрального и определяется из выражения

$$\Delta\alpha = \frac{R_a - \sqrt{R_a^2 - z^2}}{r}, \quad (5)$$

где R_a — заданный радиус дуги окружности базовой линии смещения исходного контура на развертке делительного цилиндра радиуса r , формирующей линию смещения исходного контура для арочных зубьев с постоянной шириной.

Этот угол для торцевого поперечного сечения зуба с постоянной шириной определяется из выражения

$$\Delta\alpha_t = \frac{R_a - \sqrt{R_a^2 - (b_w/2)^2}}{r_1}, \quad (6)$$

где b_w — ширина арочного колеса.

Для беззазорного арочного зацепления с постоянной шириной зубьев выражение для определения угла δ_A , входящего в формулу (3), имеет вид

$$\delta_A = \frac{\pi}{2z_1} - \text{inv}(\alpha_t) + \text{inv}(\alpha_y), \quad (7)$$

где z_1 — число зубьев первого колеса.

Угол $\tau_{\text{ц}}$ между направлением силы P , действующей на центральное поперечное сечение, и плоскостью опасного сечения (рис. 6, б)

$$\tau_{\text{ц}} = \alpha_y + \varphi_1. \quad (8)$$

Для других элементарных зубьев этот угол τ определяется из выражения

$$\tau = \alpha_y + \varphi_1 + \Delta\alpha. \quad (9)$$

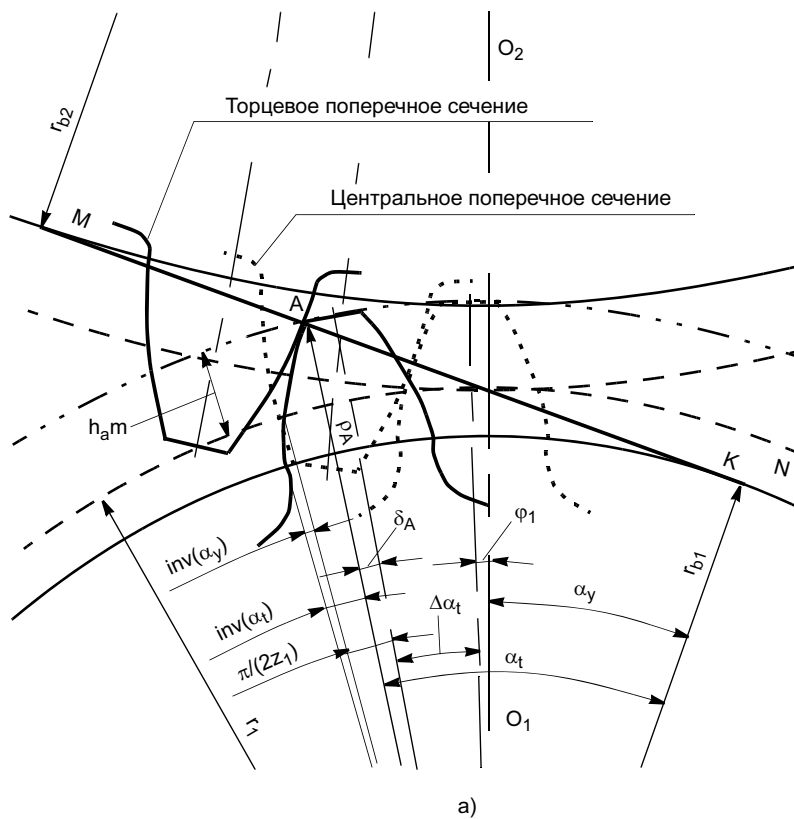
Ширина $S_{\text{оп}}$ опасного сечения элементарных зубьев для арочного бочкообразного зацепления определяется из рис. 7 и по формуле

$$S_{\text{оп}} = 2r_{\text{оп}} \sin \left[\text{inv}(\alpha_y) - \text{inv}(\alpha_{\text{оп}}) + \frac{\pi}{2z_1} - \frac{\Delta s}{r_1} \right], \quad (10)$$

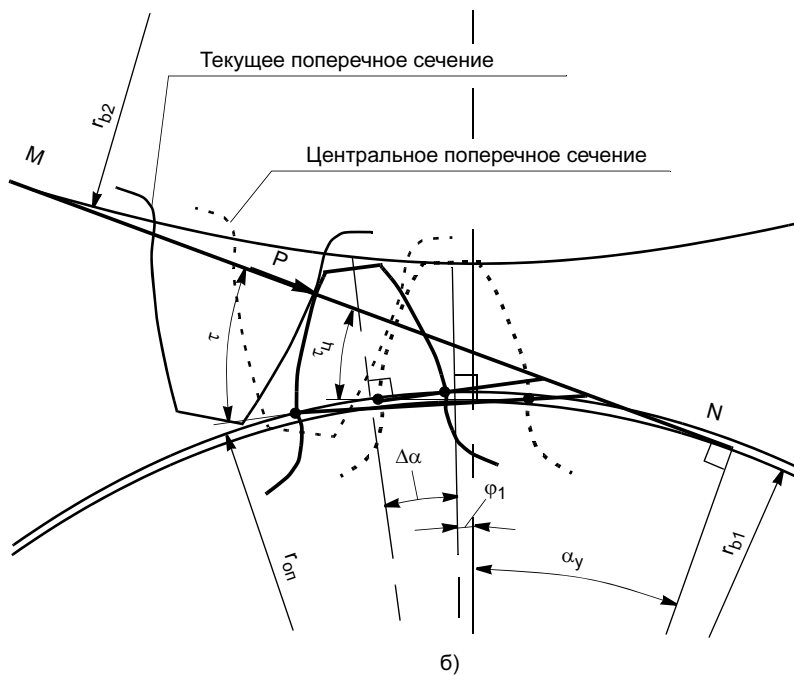
где $\alpha_{\text{оп}}$ — угол между радиус-вектором ρ_G точки G и радиус-вектором точки Q касания основной окружности с нормалью к эвольвенте в точке G ; определяется по соотношению

$$\alpha_{\text{оп}} = \arccos \left(\frac{r_{b1}}{r_{\text{оп}}} \right).$$

Отношение $\frac{\Delta s}{r_1}$ представляет собой угол между



а)



б)

Рис. 6. К определению угла ϕ_1 (а) и углов τ_c и τ (б)

радиус-векторами O_1D и O_1E точек D и E на делительной окружности в сечении элементарных зубьев для зацепления с постоянной шириной арочных зубьев и с бочкообразными зубьями. На рис. 7, а сечение для элементарных зубьев с постоянной шириной показано штриховой линией, а для бочкообразных зубьев — сплошными линиями.

В центральном поперечном сечении арочного зацепления (рис. 7, б) ширина опасного сечения

$$S_{\text{опц}} = 2r_{\text{оп}} \sin \left[\text{inv}(\alpha_y) - \text{inv}(\alpha_{\text{оп}}) + \frac{\pi}{2z_1} \right]. \quad (11)$$

Из теории эвольвентного зубчатого зацепления известно, что радиус $r_{\text{оп}}$ начала эвольвентного профиля зуба (см. рис. 4, 7) принимается равным радиусу r_{b1} основной окружности при $r_{b1} \geq r_1 - h_a m$. При $r_{b1} < r_1 - h_a m$ радиус $r_{\text{оп}} = r_1 - h_a m$.

Плечо h (см. рис. 7, а) действия тангенциальной составляющей P_τ силы P в поперечном сечении относительно опасного сечения определяется из выражения

$$h = \frac{r_b}{\cos \tau} - \sqrt{r_{\text{оп}}^2 - \left(\frac{S_{\text{опц}}}{2}\right)^2}. \quad (12)$$

В центральном поперечном сечении (см. рис. 7, б) плечо

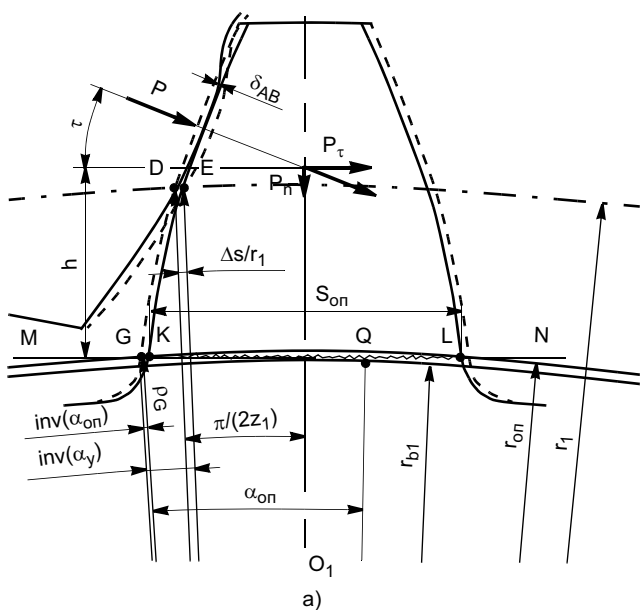
$$h_c = \frac{r_b}{\cos \tau_c} - \sqrt{r_{\text{оп}}^2 - \left(\frac{S_{\text{опц}}}{2}\right)^2}. \quad (13)$$

Ширину b_k пятна контакта по высоте в зацеплении бочкообразных зубьев определим из известного параметрического уравнения эвольвенты в цилиндрической системе координат [6]:

$$\begin{cases} \varphi(\alpha) = \text{tg} \alpha - \alpha; \\ \rho(\alpha) = \frac{r_b}{\cos \alpha}, \end{cases} \quad (14)$$

где α — угол между радиус-вектором $\rho(\alpha)$ точки A на эвольвенте и касательной к основной окружности радиуса r_b , проходящей через эту точку (рис. 8).

Ширину пятна контакта b_k по высоте зубьев определим из уравнений эвольвент в поперечных сечениях элементарных зубьев в декартовой системе координат с центром O_1 , расположенным на оси



$$\begin{cases} x = \frac{r_{b1}}{\cos \alpha_1} \sin(\operatorname{tg} \alpha_1 - \alpha_1) \cos \beta_1 + \\ + \frac{r_{b1}}{\cos \alpha_1} \cos(\operatorname{tg} \alpha_1 - \alpha_1) \sin \beta_1; \\ y = \frac{r_{b1}}{\cos \alpha_1} \sin(\operatorname{tg} \alpha_1 - \alpha_1) \sin \beta_1 + \\ + \frac{r_{b1}}{\cos \alpha_1} \cos(\operatorname{tg} \alpha_1 - \alpha_1) \cos \beta_1, \end{cases} \quad (16)$$

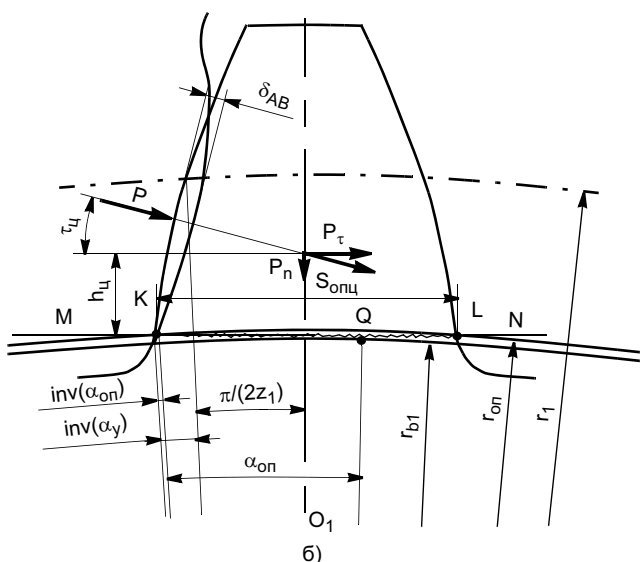
где α_1 — базовый параметр; $\Delta \alpha_1 = \frac{R_a - \sqrt{R_a^2 - z^2}}{r_1}$;

$\beta_1 = -\varphi_1 - \Delta \alpha_1 - \operatorname{inv}(\alpha_\gamma) - \pi/(2z_1) + \Delta s/r_1$.

При отсутствии зазоров в зацеплении и повороте одного колеса на угол φ_1 второе зубчатое колесо с

числом зубьев z_2 поворачивается на угол $\varphi_2 = \frac{z_1}{z_2} \varphi_1$.

Параметрическое уравнение эвольвенты второго колеса имеет вид



$$\begin{cases} x = \frac{r_{b2}}{\cos \alpha_2} \sin(\operatorname{tg} \alpha_2 - \alpha_2) \cos(\beta_2 - \pi) + \\ + \frac{r_{b2}}{\cos \alpha_2} \cos(\operatorname{tg} \alpha_2 - \alpha_2) \sin(\beta_2 - \pi); \\ y = m \frac{z_1 + z_2}{2} - \frac{r_{b2}}{\cos \alpha_2} \sin(\operatorname{tg} \alpha_2 - \alpha_2) \times \\ \times \sin(\beta_2 - \pi) + \frac{r_{b2}}{\cos \alpha_2} \cos(\operatorname{tg} \alpha_2 - \alpha_2) \times \\ \times \cos(\beta_2 - \pi), \end{cases} \quad (17)$$

Рис. 7. К определению ширины опасных сечений зубьев и плеч действующих на них сил для текущего (а) и центрального (б) поперечных сечений арочного зацепления

колеса в центральном поперечном сечении (рис. 9), по формуле

$$b_k = \sqrt{(x_K - x_L)^2 + (y_K - y_L)^2}, \quad (15)$$

где x_K, x_L, y_K, y_L — координаты точек K и L условного пересечения эвольвент, соответствующего углу пересечения $\Delta \varphi$ контактного сближения зубьев при нагружении.

Параметрическое уравнение эвольвенты первого колеса в поперечном сечении арочного зацепления с бочкообразными зубьями в системе координат XO_1Y с учетом уравнения (14) принимает вид

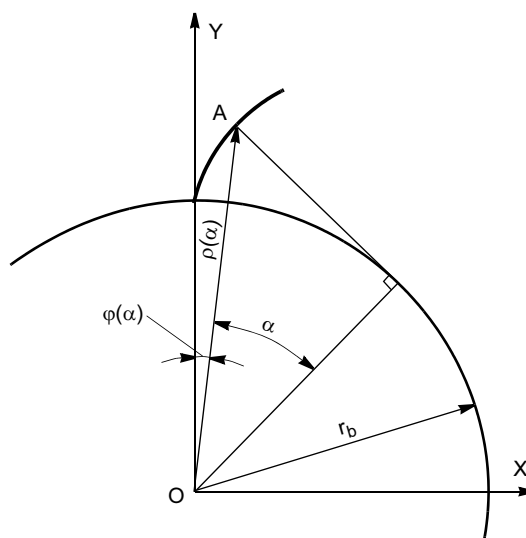


Рис. 8. К определению параметрического уравнения эвольвенты

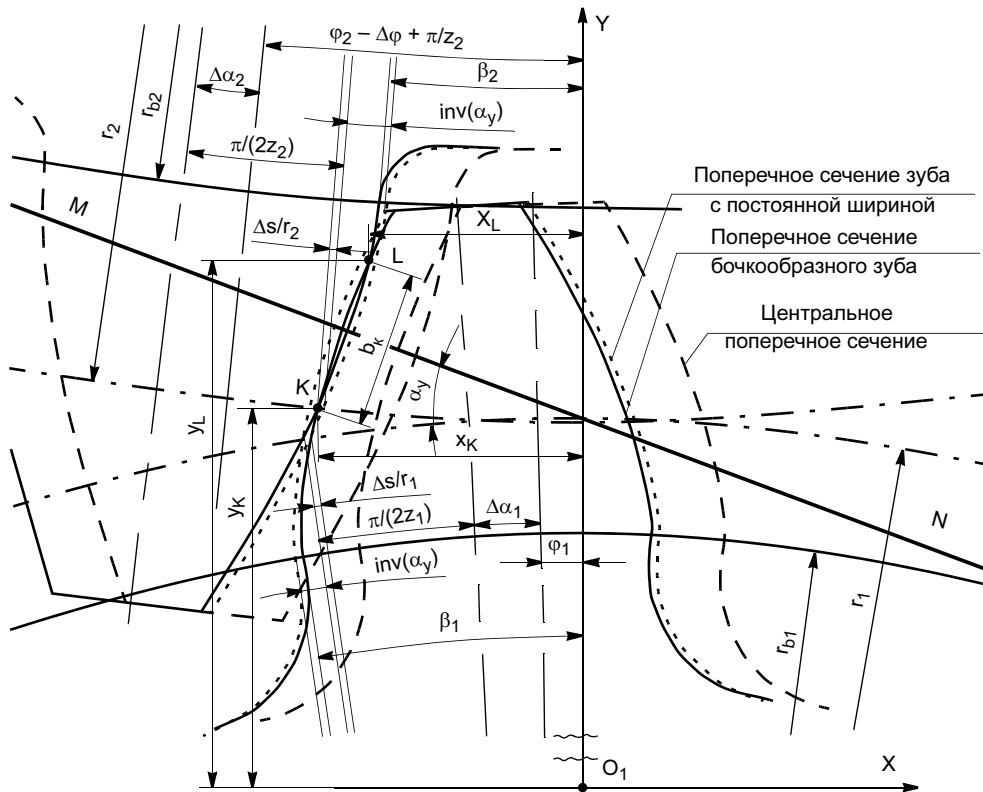


Рис. 9. К определению ширины пятна контакта b_k

где α_2 — базовый параметр; $\Delta\alpha_2 = \frac{R_a - \sqrt{R_a^2 - z^2}}{r_2}$;

$$\beta_2 = \varphi_2 - \Delta\varphi + \pi/(2z_2) + \Delta\alpha_2 - \text{inv}(\alpha_y) + \Delta s/r_1.$$

Системы уравнений (16), (17) и (2)—(13) содержат два неизвестных Δs и $\Delta\varphi$. Для решения этих систем при синтезе используют метод последовательных приближений, при котором угол $\Delta\varphi$ последовательно задается от минимального значения, получаемого из решения контактной задачи Герца для арочного зацепления с постоянной шириной зубьев при заданном нагружении. По минимальному значению $\Delta\varphi$ из решения уравнений (16), (17) определяют координаты точек K, L и ширину пятна контакта b_k , а из решения системы уравнений (2)—(13) — отклонения Δs линий смещения исходного контура выпуклой и вогнутой сторон арочных бочкообразных зубьев в поперечных сечениях. Увеличивая с заданным интервалом минимальный угол $\Delta\varphi$, при том же нагружении определяют новые отклонения Δs и формы линий смещения исходного контура для арочного зацепления бочкообразных зубьев. Сравнивают вновь получаемое значение $\Delta\varphi$ из решения контактной задачи Герца для бочкообразных зубьев с ранее полученным и по разнице значений $\Delta\varphi$ в

зависимости от заданной точности принимают окончательное решение задачи синтеза. Полученные окончательные значения Δs в каждом сечении на развертке делительного цилиндра определяют развертки синтезированных линий смещения исходного контура (рис. 3, б) арочных бочкообразных зубьев с требуемой точностью, зависящей от заданного числа сечений. Эти отклонения определяют продольный профиль зубьев.

Для выполнения синтеза арочного зацепления с бочкообразными зубьями разработаны программные модели с использованием программного комплекса "T-Flex", с помощью которого выполняют геометрические построения и определяют технологические параметры для станка с ЧПУ при нарезании зубьев с требуемой точностью. Эти параметры определяют законы движения режущего инструмента при нарезании зубьев.

Таким образом, применение предложенной методики синтеза позволяет получить арочное зацепление с бочкообразными зубьями, исключая выход пятна контакта на кромки зубьев колес и обеспечивающее равномерное распределение нагрузки по длине зуба, повышение нагрузочной способности и износостойкости цилиндрического арочного зацепления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев А. И., Сирицин А. И., Сирицин Д. А. Обеспечение теоретически точной геометрии зубьев цилиндрических арочных передач // Качество и долговечность зубчатых передач и редукторов. Харьков, 1995. С. 69.
2. Беляев А. И., Сирицин А. И., Сирицин Д. А. Особенности изготовления и применения высокоточных арочных тяговых зубчатых передач // Вестник машиностроения. 1997. № 1. С. 3—6.
3. Беляев А. И., Сирицин А. И., Сирицин Д. А. Результаты испытаний арочных зубьев колес на износ и сопротивление усталости при изгибе // Вестник машиностроения. 1997. № 1. С. 6—8.
4. Беляев А. И., Сирицин А. И., Сирицин Д. А. Геометрический расчет и технология нарезания колес с арочными зубьями // Вестник машиностроения. 1999. № 1. С. 6—8.
5. Решетов Д. Н. Детали машин: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1989. С. 151—191.
6. Теория механизмов и машин / К. В. Фролов, С. А. Попов, А. К. Мусатов и др.: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1987. С. 360—361.

Д. А. ТРЕПОВ, аспирант, М. В. ЦЕРУЛЕВ, бакалавр, В. В. СЛЕПЦОВ, д-р техн. наук
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Очистка и стерилизация стенок каналов малых диаметров в жидкой среде

В медицине, пищевой промышленности, а также других отраслях постоянно ведется поиск более совершенных методов очистки, дезинфекции и стерилизации полимерных изделий. Традиционные методы, хотя хорошо изучены и надежны, в связи с более высокой температурой либо по технологическим причинам (например каналы малого диаметра) не позволяют решать эти проблемы. Применяемые для этих целей жидкие реагенты действуют лишь как обеззараживающие вещества, а некоторые из них являются токсичными и раздражающими веществами. Их применение сильно ограничено. Например, оксид этилена, считающийся в настоящее время основным средством низкотемпературной стерилизации, токсичен и требует длительного времени воздействия. Использование перекиси водорода, перуксусной кислоты и др. также сопровождается проблемой утилизации химических остатков и раздражением кожи и дыхательных путей медицинского персонала.

Применение метода γ -стерилизации медицинских изделий осложняется необходимостью использования радиационных источников, а также разрушением некоторых полимерных материалов. Методы стерилизации, основанные на использовании ВЧ- и СВЧ-полей, требуют длительного воздействия на объект стерилизации и имеют другие ограничения.

Отдельной является проблема стерилизации узких каналов. Это связано с тем, что перед стерилизацией их необходимо механически очистить.

Методы очистки при помощи ультразвука обладают рядом ограничений, так как их воздействие может разрушать конструкции самих обрабатываемых изделий.

Таким образом, ряд отраслей нуждается в очистке и стерилизации при невысоких температурах, более мягких условиях по сравнению с существующими традиционными методами и не требующими применения токсичных реагентов.

Одним из решений проблемы может стать применение электрического разряда в жидкости. Его основными преимуществами являются локальность и комплексность воздействия. В этом случае воздействие представляет целый ряд физических и химических явлений, происходит только в поверхностном слое и не затрагивает материал конструкции.

Это явление преобразования энергии высоковольтного импульсного электрического разряда в жидкости главным образом в механическую энергию ударных волн сопровождается рядом вторичных процессов. Первые работы, в которых указывалось на возможность применения высоких давлений, возникающих при высоковольтном разряде в жидкости, появились в конце 40-х—начале 50-х гг. [2].

Суть явления заключается в том, что в объеме жидкости, находящейся в открытом или закрытом сосуде, специально сформированным электрическим импульсом создается разряд, который формирует сверхвысокие гидравлические давления, способные совершать полезную механическую работу, сопровождающуюся комплексом физических и химических явлений [2].

Эффективность подвода энергии определяется не столько конструкцией электродной системы (ЭС), а параметрами электрического импульса (крутизной фронта, амплитудой тока и напряжения) [1].

При длительных импульсах порядка нескольких микросекунд и энергиях, характерных для мягкого режима электрогидравлического удара (ЭГУ), мгновенная мощность может достигать 10 МВт, а мгновенное значение тока — десятков килоампер. Все это обуславливает резкое возрастание давления в жидкости, вызывающее в свою очередь мощное механическое действие разряда. Поэтому организованный в узком канале ЭГУ может обеспечить не только очистку, но и стерилизацию.

Цель данной работы заключается в разработке оборудования для отмывки каналов малых диаметров

ров от органических и неорганических загрязнений при их одновременной стерилизации путем преобразования электрической энергии в комплексное физико-химическое воздействие, локализованное в области загрязнения и соизмеримое с геометрией канала и рельефом его поверхности с помощью разряда в жидкости. Масштаб локальности от долей миллиметра до 10 см.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные авторами и рядом исследователей [3] показали, что в результате воздействия импульсного электрического разряда на жидкую фазу возникает взаимосвязанная сумма эффектов, которой достаточно для получения эффекта очистки, дезинфекции и стерилизации.

Электрический разряд в жидкости приводит к [1]:

- появлению ударных волн со звуковой и сверхзвуковой скоростями;
- возникновению инфра- и ультразвуковых колебаний, генерации электромагнитного излучения в ИК, видимом, УФ и рентгеновском диапазонах спектра;
- ионизации соединений и элементов, содержащихся в жидкости.

Все перечисленные факторы оказывают на жидкость и помещенные в нее объекты разнообразные физико-химические воздействия. Ударные волны жидкости вблизи зоны разряда, возникающие при развитии и схлопывании кавитационных полостей, размер которых зависит от прикладываемой мощности, оказывают механическое воздействие только на тонкий поверхностный слой обрабатываемого изделия, что обуславливает избирательность процесса очистки [4].

Электромагнитные поля разряда также оказывают мощное влияние как на сам разряд, так и на ионные процессы, протекающие в окружающей его жидкости. Под их воздействием могут происходить физические и химические изменения в обрабатываемом материале, которые исследованы недостаточно полно и могут представлять самостоятельный научный интерес.

Предполагается, что обеззараживающее действие импульсного электрического разряда в воде связано с несколькими факторами влияния на микроорганизмы. Под действием свободных атомов и радикалов происходит распад аминокислот и белка, деполяризация нуклеиновых кислот, расщепление других биологически активных веществ. Кроме того, происходит непосредственное воздействие на микроорганизмы ударной волны и ультрафиолетовое излучение разряда в жидкости [3]. Обеззараживающее действие продолжается длительное время после прекращения разрядной обработки (сутки, недели и более), что вызвано действием продуктов реакции разряда в жидкости. Явно выраженное бак-

терицидное действие на микробную клетку отмечается при энергии разряда $(0,6—0,8)10^2$ Дж [3].

При мощном импульсном разряде в воде ударная волна зарождается и формируется в непосредственной близости от оси разряда на расстоянии $\sim 3—5$ мм от нее. Из механизмов деструкции микроорганизмов ударной волной наиболее вероятный — дробление вследствие развития неустойчивости при обтекании. Требуемый перепад давления оценивается значением более $(0,6—1,35)10^2$ МПа. Эта величина может служить ориентиром для практической реализации условий деструкции микроорганизмов при однократном воздействии разряда [3].

Однако теоретически и на основании существующих экспериментальных материалов можно определить только основные факторы, способствующие процессу стерилизации и очистки поверхности. Масштаб воздействия указанных факторов в настоящее время теоретически и на основании существующих экспериментальных данных определить невозможно. Это связано с комплексным характером протекающих процессов, зависящих от конструкции разрядного промежутка, параметров импульсного разряда (тока, напряжения, времени импульса, а также его формы и крутизны), свойств жидкой фазы, геометрии канала, химического состава и гидродинамики жидкой фазы.

В этой связи актуальной и своевременной задачей разработки является экспериментальные исследования масштаба влияния каждого воздействия отдельно и в комплексе.

Если к паре электродов, погруженных в жидкость (слабый электролит), приложить напряжение, превышающее напряжения пробоя данной среды, происходит пробой (рис. 1). Однако прежде чем в межэлектродном промежутке l_p появятся условия

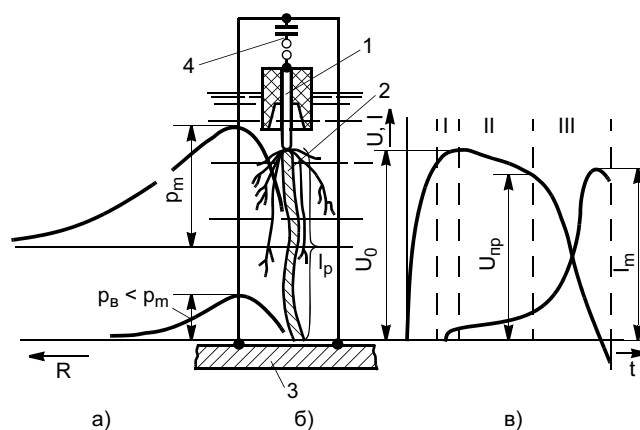


Рис. 1. Схема импульсного электрического разряда в жидкости (б), кривые изменения во времени тока и напряжения в межэлектродном промежутке (в) и поля давлений в ближней зоне разряда (а): 1 — электрод—анод; 2 — канал электрического разряда; 3 — электрод—катод; 4 — внешний разрядный контур

инициирования пробоя, проходит некоторое время (стадия I), и в разрядном промежутке появляется ток. Далее следует стадия формирования разряда (стадия II), характеризующаяся некоторым ростом тока, спадом напряжения и завершающаяся образованием высокопроводящего канала электрического разряда (КЭР).

В образовавшемся КЭР в течение 10—100 мкс выделяется энергия, накопленная батареей конденсаторов. Вещество КЭР разогревается до температуры $(20—40)10^3$ К, а давление поднимается до $(1—1,5)10^3$ МПа. Под действием этого давления КЭР расширяется, получает сравнительно большие скорости, которые направлены по радиусам, исходящим примерно из центральной части разрядного промежутка l_p . Жидкости передается высокое давление плазмы и под ее действием жидкость сжимается. Область этого сжатия ограничивается скачком давления извне — движущимся фронтом волны сжатия. Из КЭР энергия разогретой плазмы с помощью волны сжатия передается непосредственно окружающей среде, обрабатываемой разрядом (стадия III) [1].

Технологическое оборудование для обработки с помощью электрического разряда в жидкости независимо от конкретного назначения и обрабатываемых объектов имеет блок-схему (рис. 2), состоящую из следующих основных частей: разрядного технологического блока 3, содержащего ЭС — инструмент воздействия на вещество; генератора импульсных токов (ГИТ) 2 — источника питания, связанного с разрядным технологическим блоком разрядным контуром 1; объединенного блока управления ГИТ и технологическим циклом 7, блока основных устройств 4, блока вспомогательных устройств 6 и блока вспомогательных систем 5 [1].

Разрядный технологический блок предназначен для эффективного преобразования электрической энергии в другие виды энергии, передачи преобразованной энергии на объекты обработки для осу-

ществления технологических процессов в этом же блоке. ГИТ обеспечивает первичное преобразование электрической энергии к виду, удобному для формирования мощного электрического разряда в жидкости. Объединенный блок управления ГИТ и технологическим циклом выполняет все включения (коммутации) потребителей электроэнергии в заданной последовательности технологических операций.

Основные устройства необходимы для перемещений исполнительных органов в целом и элементов, а также рабочей среды в них, а вспомогательные устройства обеспечивают загрузку и выгрузку объектов обработки или переработки в разрядный технологический блок, удаление отходов переработки, разделение их при необходимости и т.п. Вспомогательные системы предназначены для транспортировки и регенерации рабочей жидкости за пределами разрядного технологического блока, регенерации отходов переработки, выполнения контрольных функций. Они могут быть предназначены для обеспечения как заданных характеристик ГИТ (охлаждения накопителей, разрядников), так и заданных характеристик разрядного технологического блока (стабилизации разряда в электродных системах).

Разработан макет установки импульсной очистки каналов малого диаметра в жидкой среде, состоящей из аксиальной ЭС и импульсного блока питания (БП). Межэлектродное расстояние ЭС составляет от 0,5 до 2 мм. БП позволяет реализовать импульсный режим со следующими параметрами: амплитуда импульсного напряжения до 1,2 кВ (мягкий режим), импульсная мощность порядка 50 кВт, длительность импульса около 10 мкс, энергия импульса не менее 100 Дж, расстояние между электродами 1 мм.

Проведены предварительные экспериментальные исследования импульсного режима очистки стенок капилляров, давшие положительный результат. В качестве рабочей среды опробованы вода (в том числе дистиллированная и деионизованная) и водный раствор NaCl. Отмечено, что наиболее перспективным является применение водных растворов NaCl.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулый Г. А., Малюшевский П. П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. Киев: Наукова думка, 1977. 176 с.
2. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект. М.: Машгиз, 1955. 51 с.
3. Сытин И. А. Электрогидравлическое действие на микроорганизмы. Киев: Здоровье, 1982. 75 с.
4. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
5. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 592 с.

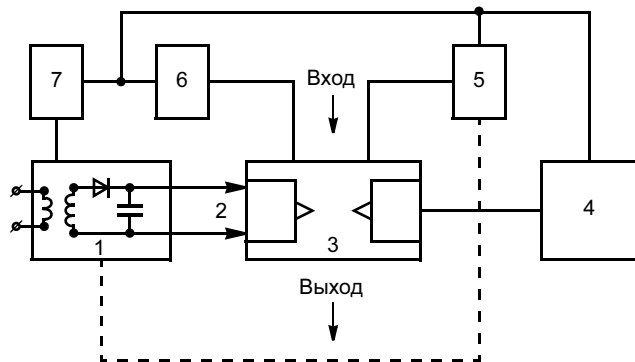


Рис. 2. Блок-схема силовой импульсной системы с использованием ЭГУ

Г. М. ЗАГРУТДИНОВ, д-р тех. наук, Г. З. БАРИЕВА, инж.,
В. А. ПРИЩЕПА, инж.

ОАО "Казанский научно-исследовательский институт авиационной технологии"

Автоматизированная система метрологических исследований измерительных каналов информационно-измерительных систем

Решение конкретных задач производственной и научной деятельности, управления качеством продукции требует получения результатов измерений необходимой точности. Даже небольшая доля недостаточно точных измерений может нанести значительный ущерб предприятию. Характерная особенность измерения — наличие погрешности и непрерывное повышение требований к точности — стимулирует совершенствование методов и способов оценки погрешности измерений и приборов. Определение показателей точности измерений требует установления вида закона распределения погрешности измерений или отнесения его к какой-либо характерной группе законов распределения, например, к законам, соответствующим стандартным аппроксимациям функций распределения (табл. 1). Однако при этом погрешности самих средств измерений должны быть определены корректно [1—6].

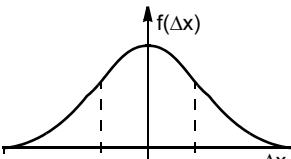
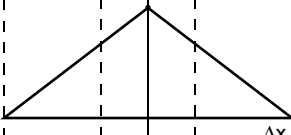
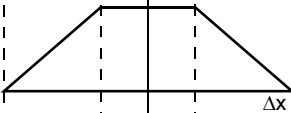
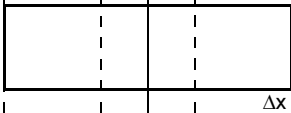
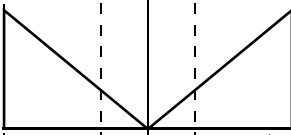
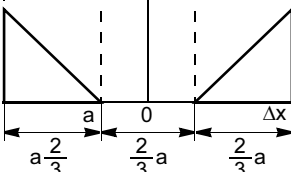
Разработана система экспериментального определения градуировочных и метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем (ИИС), учитывающая законы распределения случайных погрешностей. В системе принимается допущение о возможности производить измерения на фиксированных значениях измеряемой величины. Предполагается также, что динамические погрешности отсутствуют.

Для определения градуировочных и метрологических характеристик измерительных каналов ИИС производится n -кратное снятие градуировочных характеристик на прямом и обратном ходах (со стороны меньших и больших значений измеряемой величины соответственно) в N точках диапазона измерений. Значения n и N задаются в нормативно-технической документации на ИИС.

Определение метрологических характеристик измерительных каналов ИИС в каждой точке диапазона измерений производится в следующей последовательности.

1. Исключение аномальных результатов измерений по критерию Смирнова—Грэббса.

Таблица 1

Наименование функции	График	a/b
Нормальная (усеченная)		3,00
Треугольная (Симпсона)		2,45
Трапецевидная		2,32
Равномерная		1,73
Антимодальная I		1,41
Антимодальная II		1,26

2. Построение оптимальной градуировочной характеристики измерительного канала методом наименьших квадратов.

3. Определение:

- погрешности от гистерезиса (вариации);
- систематической составляющей погрешности измерительного канала;
- среднего квадратического отклонения, асимметрии и эксцесса случайной составляющей погрешности измерительного канала;
- закона распределения случайной составляющей погрешности измерительного канала (построение гистограммы, проверка согласия опытного распределения с теоретическим по критерию омега-квадрат);
- доверительных границ для среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерительного канала;
- предела основной погрешности измерительного канала.

Предел основной погрешности $\delta_{пр}$ измерительного канала ИИС определяется как наибольшая среди всех точек диапазона измерений суммарная погрешность

$$\delta_{пр} = |\Delta_c| + K(p) \sqrt{\sigma^2(\Delta) + \sigma_b^2}, \quad (1)$$

где Δ_c — систематическая составляющая погрешности; $\sigma(\Delta)$ — среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности; $K(p)$ — коэффициент, зависящий от закона распределения случайной погрешности и от доверительной вероятности p ; σ_b — среднее квадратическое отклонение погрешности от гистерезиса (вариации), равное $b/(2\sqrt{3})$.

При одних и тех же значениях p коэффициенты $K(p = \text{const})$ для различных законов распределения погрешностей различаются значительно, поэтому применение точных значений коэффициентов $K(p)$ с учетом законов распределения, приведенных в табл. 2, повысит достоверность оценки

Таблица 2

Наименование законов распределения	Коэффициент $K(p)$ при вероятности p				
	0,90	0,95	0,99	0,997	0,999
Нормальный	1,64	1,96	2,58	2,97	3,29
Треугольный	1,67	1,90	2,20	2,32	2,37
Трапециевидный	1,63	1,83	2,10	2,20	2,25
Равномерный	1,56	1,65	1,71	1,73	1,73
Антимодальный I	1,37	1,38	1,40	1,41	1,41
Антимодальный II	1,22	1,24	1,26	1,26	1,26

предела основной погрешности измерительных каналов ИИС.

Проверка согласия опытного распределения случайных погрешностей с теоретическим проводится по критерию омега-квадрат (критерий Мизеса). Критерий омега-квадрат является более мощным, чем критерий хи-квадрат (критерий Пирсона).

Процедура проверки согласия опытного и теоретического распределений случайной величины x заключается в получении упорядоченного ряда результатов наблюдений этой величины

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n, \quad (2)$$

построении на основании их функции накопленных частостей и сравнении этой функции с заданной теоретической функцией.

Вычисление по критерию омега-квадрат производят в следующем порядке:

- вычисляют значение Ω_n^2 по формуле

$$\Omega_n^2 = -n - 2 \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{2j-1}{2n} \ln F(x_j) + \left(1 - \frac{2j-1}{2n} \right) \ln [1 - F(x_j)] \right\}, \quad (3)$$

где $F(x_j)$ — значение функции теоретического распределения при значении аргумента, равном x_j ; x_j ($j = 1, 2, \dots, n$) — результат наблюдений, имеющий j -й номер в вариационном ряду $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$;

— в специальной таблице находят значение функции $\beta(\Omega_n^2)$, соответствующее вычисленному значению Ω_n^2 . Функция β представляет функцию распределения величины Ω_n^2 ;

— задают уровень значимости α . Рекомендуется выбирать значение α , равное 0,1 или 0,2;

— если $\beta \geq (1 - \alpha)$, то гипотезу о согласии эмпирического и теоретического распределений отвергают, если $\beta < (1 - \alpha)$, то принимают.

Разработаны программы определения градуировочных и метрологических характеристик измерительных каналов ИИС. Пакет прикладных программ определения градуировочных и метрологических характеристик написан на языке программирования Си.

Число фиксированных точек диапазона измерений принято в программе не более 200. Число измерений в одной точке диапазона измерений принято в программе равным 40 (20 — на прямом ходе, 20 — на обратном). При этом определяются и выводятся на печать следующие метрологические ха-

характеристики измерительного канала: погрешность вариации, среднее квадратическое отклонение погрешности вариации, систематическая составляющая погрешности, среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности, доверительные границы среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности при одном из пяти значений двусторонней доверительной вероятности (0,8; 0,9; 0,98; 0,995; 0,998), предел допускаемой основной абсолютной и приведенной (в процентах) погрешностей при одном из пяти значений доверительной вероятности (0,9; 0,95; 0,99; 0,997; 0,999). Проверка согласия опытного закона распределения с теоретическим (нормальным, треугольным, трапециевидным, равномерным, антимодальным I, антимодальным II) проводится по критерию омега-квадрат. Для каждой точки диапазона измерений измерительного канала на печать выводятся также гистограммы распределения случайной составляющей погрешности, асимметрия и эксцесс.

Пакет прикладных программ определения градуировочных и метрологических характеристик позволяет также производить метрологическую поверку измерительных каналов с целью решения вопроса о пригодности измерительного канала к эксплуатации.

Выполняется следующая методика поверки:

— число измеряемых точек в диапазоне измерений — 1;

— число наблюдений для экспериментального определения значений погрешности в поверяемой точке — 40;

— доверительная вероятность определения основной погрешности измерительного канала выбирается в программном меню из ряда 0,9; 0,95; 0,99; 0,997; 0,999;

— критерий годности или негодности измерительного канала (предел допускаемой основной погрешности) вводится в программу из нормативно-технической документации на ИИС;

— результаты поверки (измеренные коды, метрологические характеристики, сообщение о соответствии основной погрешности измерительного канала заданному в нормативно-технической документации значению) записываются в протокол на диск.

Пакет прикладных программ определения градуировочных и метрологических характеристик, проведения метрологической поверки измерительных каналов ИИС имеет сервисную оболочку с целью создания диалогового режима. Все входные и выходные файлы данных, необходимые при работе пакета прикладных программ, записываются в удобном для пользователя текстовом виде. Протоколы метрологической аттестации и метрологической поверки измерительных каналов выводятся на экран дисплея, записываются на диск и могут быть распечатаны на принтере.

Таким образом, система обеспечивает расширение задач метрологических исследований, повышение достоверности оценки предела основной погрешности измерительных каналов ИИС и производительности труда по сравнению с традиционными способами метрологической аттестации. Методика и пакет прикладных программ могут быть применены для широкого круга средств измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загруддинов Г. М. Методика экспериментального определения метрологических характеристик измерительных трактов систем автоматизированного контроля // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. Вып. 13. Ч. 2. Казань: Изд-во Казанского университета, 1983. С. 40—73.
2. Загруддинов Г. М., Прищепа В. А. Расчет метрологических характеристик измерительных трактов систем автоматизированного контроля на ЭВМ // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. Вып. 13. Ч. 2. Казань: Изд-во Казанского университета, 1983. С. 74—95.
3. Загруддинов Г. М. К расчету предела основной погрешности измерительных трактов систем автоматизированного контроля // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. Вып. 15. Казань: Изд-во Казанского университета, 1985. С. 47—64.
4. Автоматизация определения метрологических характеристик измерительных трактов систем автоматизированного контроля / Г. М. Загруддинов, В. П. Гурьянов, Б. Ф. Петкин, В. А. Прищепа // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационная технология. Вып. 2. М.: НИАТ, 1986. С. 126—138.
5. Загруддинов Г. М., Прищепа В. А. Автоматизированная система определения градуировочных и метрологических характеристик измерительных трактов САК // Авиационная промышленность. 1991. № 10. С. 51—52.
6. Загруддинов Г. М. Определение оптимальных градуировочных характеристик измерительных трактов систем автоматизированного контроля // Авиационная промышленность. 1994. № 8. С. 43—45.

Ф. Ю. ДУРНОВ, инж., А. М. КАШИН, инж.
ООО "Компания "Нординкрафт" (Череповец)

Особенности автоматизированного УЗК листового проката

Рост объемов производства листового проката, ужесточающиеся требования к его качеству предполагают использование адекватного комплекса современных методов и средств надежного и высокопроизводительного ультразвукового контроля (УЗК). Обеспечить высокую производительность можно только с помощью систем, осуществляющих автоматизированный УЗК.

Автоматизированная система НК представляет собой систему, которая автоматически организует весь процесс контроля, начиная от загрузки объекта контроля и заканчивая сортировкой проконтролированной продукции с отмеченными дефектными зонами и выдачей протокола контроля. Задачей оператора является только настройка системы на необходимый уровень чувствительности. Автоматические системы отличаются от автоматизированных возможностью удаленного управления системой, в частности центральной системой управления предприятием. Особенности построения автоматизированных систем рассмотрим на примере автоматизированных установок УЗК листового проката.

Автоматизированная система УЗК дает возможность осуществлять контроль в непрерывном потоке производства. Это дает ряд преимуществ по сравнению с ручным контролем, но и накладывает определенные требования к таким системам. Их главным преимуществом является обеспечение высокой производительности контроля, достижение которой при использовании ручного или механизированного контроля практически невозможно. Рассмотрим требования к автоматизированным системам УЗК.

Повышенная помехозащищенность

При ручном контроле обнаруженный дефект всегда можно перепроверить и детально изучить. При автоматизированном контроле такой возможности нет. Система регистрирует дефект только один раз при превышении установленного порога чувствительности. Поэтому требования к помехозащищенности автоматизированных систем гораздо выше, чем к ручным дефектоскопам. Для обеспечения вы-

сокой достоверности контроля электронно-акустические тракты в автоматизированных установках должны быть максимально защищены от внешних электрических и акустических помех. Также должны применяться сложные алгоритмы обработки сигналов, позволяющие отличить полезный сигнал от какой-либо помехи.

Идентичность каналов электроакустического тракта

Автоматизированные установки для контроля листового проката являются многоканальными системами. В зависимости от ширины листа количество каналов может достигать нескольких сотен. Для обеспечения равномерной чувствительности контроля по всей ширине листа необходимо добиваться полной идентичности параметров каналов, используя, к примеру, систему автоматической регулировки усиления (АРУ). Система АРУ должна обеспечивать независимую регулировку усиления по каждому каналу. При этом необходимый уровень усиления должен автоматически устанавливаться для достижения одинаковой амплитуды "донного" сигнала во всех каналах контроля. Это обеспечивает возможность задания одинакового браковочного порога для всех каналов системы, что значительно упрощает настройку.

Автопозиционирование стробов

Современные технологии позволяют производить автоматизированный контроль листового проката при высоких температурах контролируемого объекта (свыше 650 °С). Это достигается использованием для возбуждения ультразвуковых колебаний электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП). Особенности применения ЭМАП, а также УЗК при повышенной температуре рассмотрены в работах [1, 2]. Однако при контроле листов в горячем состоянии происходит изменение скорости распространения ультразвуковых колебаний в зависимости от температуры объекта контроля. Для отслеживания изменений временного поло-

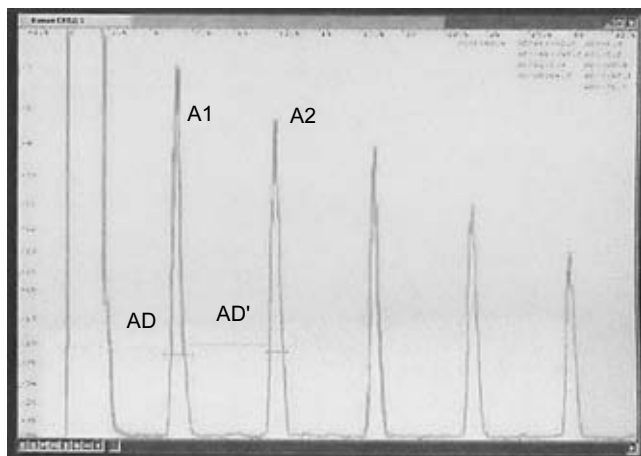


Рис. 1. Оциллограмма сигнала на участке листа с расслоением

жения принимаемых сигналов при изменении температуры листов в автоматизированных системах должен быть реализован принцип автопозиционирования стробов. На рис. 1 показан А-скан одного из каналов установки "Север-6-08" с рабочей расстановкой зон стробирования. Стробы *A1* и *A2* — стробы опорных сигналов, первого и второго отраженного от противоположной поверхности листа. Стробы *AD* и *AD'* — стробы сигналов от дефектов, которые располагаются в первом и втором рабочих интервалах соответственно. Система автопозиционирования стробов (САПС) автоматически отслеживает расположение опорных сигналов и изменяет временное положение стробов *A1* и *A2* так, чтобы максимум этих сигналов располагался в середине соответствующих стробов. Кроме того, САПС устанавливает длину строба *AD* так, чтобы временной промежуток между концом строба *AD* и серединой строба *A1* всегда был постоянен, и длину строба *AD'* так, чтобы временной промежуток между началом строба *AD'* и серединой строба *A1* и временной промежуток между концом строба *AD'* и серединой строба *A2* были постоянными.

Таким образом, САПС позволяет отслеживать изменение положения донных сигналов при любом изменении скорости распространения ультразвука, а также при изменении толщины листа.

Независимость чувствительности контроля

В процессе автоматизированного контроля возможно изменение не только скорости распространения ультразвуковых колебаний, но и их амплитуды. Это обусловлено различными акустическими параметрами контролируемого металла, такими как шероховатость поверхности, затухание ультразвука в зависимости от структуры и др.

При абсолютном методе задания чувствительности, характерном для ручного контроля, изменение таких параметров влечет за собой изменение чувствительности контроля и необходимость ее настройки по контрольным образцам. Для настройки чувствительности в многоканальных автоматизированных установках очень удобен относительный способ задания чувствительности. В этом случае браковочный уровень по каждому каналу задается относительно усредненной за достаточный промежуток времени амплитуды "донного" сигнала. Усреднение позволяет не завышать чувствительность при уменьшении амплитуды "донного" сигнала в дефектной области.

Стабильность акустического контакта

Важнейшую роль при УЗК играет обеспечение акустического контакта. При использовании пьезоэлектрических преобразователей акустический контакт между датчиком и объектом контроля обеспечивается с помощью контактной жидкости. В автоматизированном контроле с помощью ПЭП в качестве контактной жидкости чаще всего используется вода. В этом случае возникают границы разделов "протектор преобразователя—вода" и "вода—объект контроля". Известно, что небольшое изменение угла наклона преобразователя влечет за собой гораздо большее изменение угла ввода ультразвуковых колебаний. Из этого вытекает необходимость очень жестких требований к позиционированию датчика относительно поверхности объекта контроля. Использование ЭМА-преобразователей (рис. 2) позволяет существенно снизить требования к изменению угла, поскольку в этом случае ультразвуковая волна зарождается непосредственно в объекте контроля, и угол ввода колебаний зависит

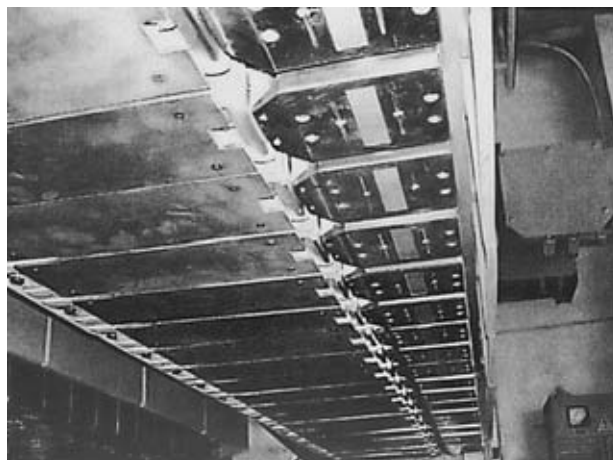


Рис. 2. Линейка четырехканальных ультразвуковых преобразователей установки "Север"

только от вида катушки-индуктора. Однако при этом возникает зависимость коэффициента двойного электромеханического преобразования от величины зазора между катушкой индуктора и объектом контроля.

При использовании спиральной катушки или катушки типа "бабочка", которые возбуждают ультразвуковые колебания, распространяющиеся по нормали к поверхности объекта контроля, чувствительность к изменению зазора составляет примерно 1 дБ на 0,1 мм. При таком способе введения ультразвуковых колебаний необходимо как можно точнее выдерживать зазор между объектом контроля и преобразователем.

В 1997 г. специалистами ООО "Компания "Нординкрафт" изобретен и запатентован способ "Воздушная подушка" для поддержания постоянного зазора между ЭМА-преобразователем и объектом контроля [1]. "Воздушная подушка" достигается путем подачи под преобразователь сжатого воздуха. В результате создается эффект "парения" преобразователя над объектом контроля с постоянным зазором. Благодаря такой системе достигается отсутствие механических взаимодействий между датчиком и объектом контроля, а также постоянство зазора в пределах 0,2 мм.

Возможность контроля необрезных листов

Как известно, при контроле любого изделия имеются непроконтролируемые зоны по краям вследствие возникновения ложных сигналов от края объекта контроля. Минимальный размер непроконтролируемой зоны равен половине ширины активной зоны преобразователя. Автоматизированные технологии контроля листового проката в необрезанном состоянии дают возможность получения обрезанного листа, проконтролированного на 100 % и не имеющего непроконтролируемых зон на краях листа. Поэтому внедрение автоматизированных установок УЗК в технологическую цепочку целесообразно производить на ранних стадиях производственного цикла до обрезки листов. Вместе с тем в технологическом потоке между прокатным станом и обрезными ножницами лист имеет достаточно высокую температуру. Проведение ручного контроля на данном этапе невозможно. Высокотемпературные технологии, реализованные в установках серии "Север", позволяют производить контроль листа в горячем состоянии с температурой до 650 °С, а, значит, контроль необрезанного листа с помощью таких установок становится возможным.

Кроме того, достоинством контроля листов в горячем состоянии является возможность обнаружения брака на ранних стадиях производственного

цикла, что позволяет избежать затрат на выполнение последующих операций с бракованной продукцией. Чем раньше принято решение о годности объекта контроля, тем это выгоднее для предприятия, изготавливающего эту продукцию.

Уменьшение дискретности контроля

Одной из важных проблем автоматизированного контроля на сегодняшний день является проблема стандартов. Изначально стандарты для УЗК создавались для ручного контроля, но и сегодня большинство из них являются основными. Однако между ручным и автоматизированным контролем есть ряд принципиальных различий, которые обуславливают актуальность корректировок, дополнений и изменений современных стандартов УЗК. К примеру, при ручном контроле возможно исследование дефекта под различными углами и на различных частотах с целью определения точных условных размеров дефектов. При автоматизированном контроле каждый из ультразвуковых преобразователей движется по своей заданной траектории, имеющей вид прямой линии. Дискретность контроля при этом равна ширине активной зоны преобразователя, которая может находиться в пределах от 15 до 25 мм. С точки зрения оценки реальных размеров дефектов необходимо уменьшение этой дискретности. Для этого следует уменьшать рабочую зону преобразователя, что повлечет увеличение количества преобразователей и каналов обработки, существенно повысит стоимость оборудования и будет экономически нецелесообразным. Итак, за счет существующей дискретности автоматизированного контроля становится невозможно точно определить условные размеры дефекта. Минимальным размером дефекта в этом случае будет рабочая зона преобразователя, а с увеличением размеров дефекта определение его площади будет расти с таким же шагом.

Повышение объективности контроля

Одним из значимых параметров автоматизированного контроля является выдача документа с окончательным результатом на проконтролированную продукцию. Продукция, которая признана годной, может быть отправлена потребителю без дополнительных пере проверок, а бракованная должна идти на переплавку. В ряде случаев продукции присваивается статус — "не проконтролировано". Это может произойти в силу контроленепригодности объекта контроля. Контроленепригодность — понятие весьма относительное и связано со спосо-



Рис. 3. Установка для автоматизированного УЗК листового проката "Север 6-08-2800" в ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат"

бом контроля. Так, автоматизированный контроль предъявляет более высокие требования к некоторым параметрам объекта контроля, таким как отклонение геометрических параметров и чистоты поверхности. Как поступать в случае контроленепригодности, решает изготовитель металлопроката: или считать эту продукцию бракованной и отправить на переплавку, или подвергнуть ее ряду операций для придания параметров, необходимых для проведения автоматизированного контроля, и провести контроль повторно, или провести ручной УЗК, или вообще проконтролировать с помощью других неразрушающих методов контроля.

Стоит также обратить внимание на то, что при автоматизированном контроле максимально исключается человеческий фактор, что является существенным преимуществом над контролем ручным. Автоматизированная установка самостоятельно диагностирует оборудование, осуществляя 100 %-ный контроль с необходимым перекрытием, и выдает документ с отображением всех параметров контроля продукции. Это существенно уменьшает возможность недобросовестного или невнимательного проведения контроля, которое нередко встречается при ручном контроле и может повлечь за собой катастрофические последствия.

Компания "Нординкрафт" является лидером по изготовлению автоматизированных систем НК металлопроката в России и странах СНГ. В период с 1997 по 2006 гг. специалистами компании разработано, изготовлено и внедрено в промышленную эксплуатацию 14 установок автоматизированного УЗК листового проката. Автоматизированные установки серии "Север" (рис. 3, 4) успешно эксплуатируются в листопрокатных цехах металлургических

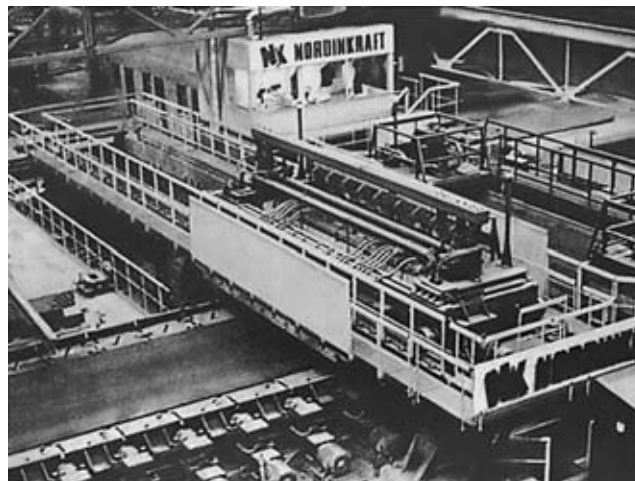


Рис. 4. Установка для автоматизированного УЗК "Север 6-08-5000" в ОАО "Северсталь"

предприятий ОАО "Северсталь", ОАО "Волжский трубный завод", ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат", ОАО "Алчевский металлургический комбинат", ОАО "Уральская сталь" и др. Последнее достижение компании — установка пятого поколения "Север-6-08-V" (рис. 5), изготовленная для одного из металлургических предприятий Японии.

Сегодня установки компании "Нординкрафт" способны обеспечить высокопроизводительный достоверный контроль листового проката любого типоразмера с температурой от -30 до 650 °С по любому существующему стандарту. В этих установках реализованы все вышеперечисленные особенности, необходимые для обеспечения эффективной работы автоматизированных систем УЗК листового проката.

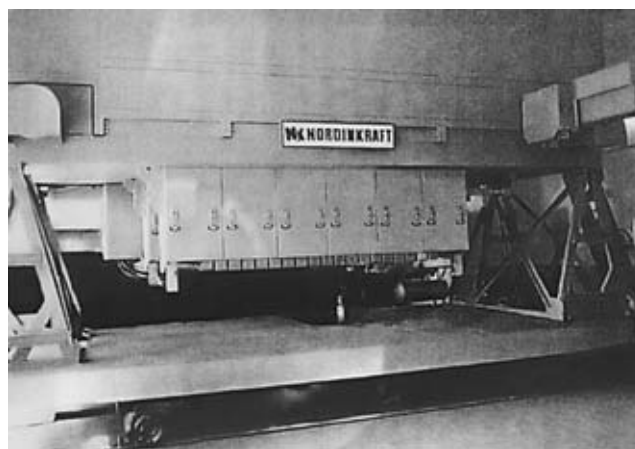


Рис. 5. Установка УЗК "Север-6-08-V": контрольная сборка в цехе компании "Нординкрафт" перед отгрузкой на экспорт

Технологический процесс производства металла — это взаимосвязанная система, включающая различные звенья цепи. От грамотной и правильной организации работы каждого звена зависит производительность и экономические показатели предприятия в целом. Автоматизированная система контроля качества металла — это необходимое и важное звено в технологическом потоке предприятия. В современных условиях только предприятие, имеющее высокопроизводительные автоматизированные системы контроля качества метал-

ла, может быть конкурентоспособным и обеспечить продвижение своей продукции на рынке за счет ее высокого качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириков А. В., Забродин А. Н. Особенности применения ЭМАП при УЗК проката // В мире НК. 2002. № 1(15). С. 5—8.
2. Особенности УЗК листового проката при повышенной температуре / А. В. Кириков, А. Н. Забродин, С. К. Паврос и др. // В мире НК. 2005. № 3 (29). С. 53—55.

В мире неразрушающего контроля, 2006, № 3

В. В. СТЕПИН, инж.

ОАО "НПО электромеханики" (Миасс Челябинской обл.)

Методика повышения точности частотного анализа

Введение. В последние годы все более широкое распространение при неразрушающем контроле и технической диагностике изделий получают частотные анализаторы на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ), выдающие результат анализа входного сигнала в виде графика спектра и численных значений частоты и амплитуды выделенной линии спектра. В этих анализаторах амплитуда каждой линии спектра вычисляется как геометрическая сумма действительной и мнимой компонент линии, а частота — как произведение порядкового номера линии на частотное разрешение спектра. Поэтому шкала частот получается дискретной и, если фактическая частота гармонической составляющей анализируемого сигнала не точно совпадает с линией спектра, то выводимые численные значения параметров линии, воспринимаемые пользователем как параметры соответствующей составляющей входного сигнала, содержат методические погрешности по частоте (до половины частотного разрешения спектра) и амплитуде, занижение которой может превышать 15 % (эффект "частотола"). Наиболее важное значение для технической диагностики имеет точность измерения частот, так как именно частота позволяет идентифицировать источник конкретной составляющей входного сигнала.

Настоящая методика разработана с целью уменьшения указанных погрешностей при расчете численных значений параметров обособленных пиков спектра путем вычисления поправок к амплитуде и частоте с использованием в качестве аргумента отношения амплитуды линии спектра, предшествующей обособленному пику, к амплитуде линии, следующей за ним (обособленным пиком считается линия спектра, у которой амплитуды по

крайней мере двух линий спектра по обе стороны от нее монотонно уменьшаются).

Методика предназначена для использования при разработке программно-математического обеспечения частотных анализаторов, работающих с БПФ.

Исходные данные. Для получения исходных данных проводили измерения параметров обособленного пика спектра синусоидального сигнала генератора ГЗ-118 компьютерным частотным анализатором "Вибротест" по программе, использующей временное окно Хэннинга и обеспечивающей частотное разрешение спектра $Sf = 6,827473$ Гц. Измерения проводили при девяти значениях частоты F входного сигнала, изменяемой с шагом $0,85344$ Гц ($0,125$ частотного разрешения) от $71,689$ до $78,516$ Гц. В качестве обособленного пика использовалась 11-я линия спектра ($Nn = 11$; ее частота $F_n = NnSf = 75,102$ Гц).

Таким образом, относительное рассогласование Df частот входного сигнала и обособленного пика варьировалось с шагом $0,125$ от $-0,5Sf$ до $0,5Sf$.

При каждом значении частоты проводили серию из четырех циклов измерений, каждый из которых включал в себя выставку частоты входного сигнала с точностью не хуже $0,001$ Гц (с контролем по частотомеру ЧЗ-54) и измерение его напряжения Uv милливольтметром ВЗ-38; измерение амплитуд 10-й линии спектра Am — линии, предшествующей обособленному пику; 11-й линии спектра An — обособленного пика и 12-й линии спектра Ab — линии, следующей за обособленным пиком.

Для каждого значения рассогласования Df вычисляли средние арифметические значения параметров Uv , Am , An , Ab , а также соответствующие им отношения $Omb = Am/Ab$ и $Ovn = Uv/An$. Полу-

Таблица 1

<i>Df</i>	-0,500	-0,375	-0,250	-0,125	0	0,125	0,250	0,375	0,500
<i>Omb</i>	4,99986	3,2142	2,1434	1,4569	1,0	0,6865	0,4665	0,3111	0,20004
<i>Ovn</i>	1,1778	1,0955	1,0408	1,0106	1,0	1,0099	1,0408	1,0954	1,1777

ченный начальный массив данных приведен в табл. 1.

Рабочий массив исходных данных. Используя симметрию относительно средней точки массива значений *Ovn* и "антисимметрию" массива *Omb* (значения справа от средней точки обратны симметричным им значениям слева от нее), можно повысить точность исходных данных осреднением симметричных значений и упростить структуру массива, сократив его объем после осреднения вдвое (табл. 2).

Расчет поправок к частоте. Используя приведенные в табл. 2 значения *Omb* в качестве абсцисс, а значения *Df* в качестве соответствующих ординат и рассматривая эти ординаты как текущие значения аддитивной поправки *Dn* к порядковому номеру линии обособленного пика спектра, аппроксимируем зависимость *Dn* от аргумента *Omb* следующим полиномом:

$$Dn = (1,3496 + 0,2202/X - 1,5698X^{-0,35}) \times \text{sign}(1 - Omb), \quad (1)$$

где $X = \begin{cases} Omb, & (Omb \geq 1) \\ 1/Omb, & (Omb < 1). \end{cases}$

Все найденные коэффициенты полинома являются значимыми (сигма адекватности равна соответственно 0,0028, 0,0030 и 0,0057), остаточная сумма квадратов "невязок" при аппроксимации составила $1,62 \cdot 10^{-7}$, максимальное абсолютное значение "невязки" не превышает 0,0003, максимальное значение среднего квадратического отклонения вычисляемых поправок по оси *Dn* не превышает 0,00026.

Диапазон допустимых значений аргумента *Omb* от 0,2 до 5,0. Диапазон получаемых при этом расчетных значений поправок от -0,5 до 0,5.

Расчет поправок к амплитуде. Используя приведенные в табл. 2 значения *Df* в качестве абсцисс, а значения *Ovn* в качестве соответствующих

Таблица 2

<i>Df</i>	0	0,1250	0,2500	0,3750	0,5000
<i>Omb</i>	1,0	1,4568	2,1435	3,2143	5,0000
<i>Ovn</i>	1,0	1,0103	1,0408	1,0955	1,1778

щих ординат и рассматривая эти ординаты как текущие значения поправочного коэффициента *Kn* к амплитуде линии обособленного пика спектра, аппроксимируем зависимость *Kn* от аргумента *Df* полиномом

$$Kn = 1 + 0,1102|Df|^{1,45} + 0,7257|Df|^{2,4}. \quad (2)$$

Все найденные коэффициенты полинома являются значимыми (сигма адекватности равна соответственно $2 \cdot 10^{-5}$, $4 \cdot 10^{-4}$ и $7 \cdot 10^{-7}$), остаточная сумма квадратов "невязок" при аппроксимации составила $1,0 \cdot 10^{-9}$, максимальное абсолютное значение "невязки" не превышает 0,000024, максимальное значение среднего квадратического отклонения вычисляемых значений поправочных коэффициентов не превышает 0,00002.

Диапазон допустимых значений аргумента *Df* от 0 до 0,5. Диапазон получаемых при этом расчетных значений коэффициента *Kn* от 1,0 до 1,1778.

Окончательные расчетные формулы. Частота обособленного пика спектра

$$Fk = (Nn + Dn)Si; \quad (3)$$

амплитуда обособленного пика спектра

$$Ak = An(1 + 0,1102|Dn|^{1,45} + 0,7257|Dn|^{2,4}), \quad (4)$$

где *Dn* — значение поправки к частоте, вычисленное по формуле (1).

Практическая проверка методики. Проверку проводили на аппаратуре "Вибротест" с программным обеспечением, обеспечивающим частотное разрешение спектра *SI* = 6,827473 Гц, в качестве обособленного пика использовали 224-ю линию спектра (частота *Fn* = 1529,35 Гц) с рассогласованием частоты *F* входного сигнала (создаваемого генератором ГЗ-110) относительно частоты *Fn* на *Df* = ±0,49 (ΔF = ±3,35 Гц) и ±0,35 (ΔF = ±2,39 Гц).

При каждом значении рассогласования измеряли напряжение входного сигнала *Uv* и амплитуды 223-й (*Am*), 224-й (*An*) и 225-й (*Ab*) линий спектра; рассчитывали аргумент *Omb* = *Am*/*Ab* и поправки *Dn* и *Kn* по полиномам формул (1) и (3), а также уточненные частоты и амплитуды 224-й линии спектра по формулам (3) и (4). Результаты приведены в табл. 3, а итоговые результаты — в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что при частотном разрешении анализатора 6,827473 Гц методика обеспечивает

Таблица 3

Рассогласование ΔF , Гц	Напряжение входного сигнала U_v , мВ	Амплитуда линий спектра, мВ			Аргумент Omb	Поправка	
		A_m	A_n	A_b		D_n	K_n
-3,35	102,434	86,453	87,419	17,835	4,8474	-0,4916	1,1713
+3,35	102,340	17,921	87,452	86,264	0,2077	0,4897	1,1699
-2,39	98,308	74,649	90,553	24,771	3,0136	-0,3557	1,0853
+2,39	98,316	25,447	91,020	73,924	0,3442	0,3446	1,0798

Таблица 4

Рассогласование ΔF , Гц	Параметр входного сигнала		Результат частотного анализа: значение (погрешность)			
			обычного		по методике	
	Частота F , Гц	Амплитуда U_v , мВ	Частота F_n , Гц	Амплитуда A_n , мВ	Частота F_k , Гц	Амплитуда A_k , мВ
-3,35	1526,00	102,434	1529,35 (+3,35)	87,419 (-15,015)	1526,00 (0,00)	102,397 (-0,037)
+3,35	1532,70	102,340	1529,35 (-3,35)	87,452 (-14,888)	1532,70 (0,00)	102,310 (-0,010)
-2,39	1526,96	98,308	1529,35 (+2,39)	90,553 (-7,833)	1526,93 (-0,03)	98,279 (-0,029)
+2,39	1531,74	98,316	1529,35 (-2,39)	91,020 (-7,296)	1531,71 (-0,03)	98,283 (-0,033)

уменьшение погрешностей измерения частоты обособленного пика спектра с 3,35 до 0,03 Гц и амплитуды с 15 до 0,00036 %, т. е. до пренебрежимо малых значений.

Возможные ограничения применимости методики. Аппроксимирующие полиномы рассчитаны по исходным данным, полученным на анализаторе с использованием временного окна Хэннинга. При использовании временного окна другого типа возможно потребуется их корректировка.

Поскольку применению методики предшествует проверка обособленности пика спектра сравнением амплитуды пика с двумя смежными линиями спектра по обе стороны от него, методика неприменима к двум первым и двум последним линиям спектра.

Вторым ограничением применимости методики является возможная гетерогенность обособленного пика (когда его амплитуда формируется двумя или более составляющими входного сигнала, разность частот которых меньше частотного разрешения спектра).

Для отдельного (единичного) результата измерения спектра выявление гетерогенности пика невозможно, однако при осреднении спектра такая возможность имеется. Дело в том, что различающиеся по частоте составляющие создают биения амплитуды пика, размах которых (и соответствующая погрешность вычисления параметров пика) определяется отношением амплитуд этих составляющих (равные амплитуды составляющих дают максимальный размах биений), поэтому при осреднении оценить гетерогенность пика можно по среднему квадратическому отклонению осредняемых значений амплитуд данной линии спектра.

При использовании методики уточненные параметры следует отмечать при выводе на экран или принтер, используя, например, для вывода первого параметра пары (как правило, это частота линии) формат вывода со знаком, в этом случае знак плюс перед значением параметра будет отличать уточненную пару параметров от обычной.

При выводе уточненной пары параметров в файл данных все выводимые пары параметров необходимо дополнять специальной переменной (флагом уточнения).

ВЫВОД

ВЫВОД

Применение методики при разработке программно-математического обеспечения анализаторов с БПФ позволяет практически исключить погрешности вычисляемых численных значений частоты и амплитуды обособленных негетерогенных пиков спектра, обусловленные дискретностью шкалы частот и эффектом "частотокола".

Г. Д. ВОЛКОВА, д-р техн. наук, Д. А. ВОЛОДИН, аспирант
МГТУ "Станкин"

Особенности разработки средств поддержки управления проектами при создании САПР машиностроительного назначения

В современных экономических условиях каждое машиностроительное предприятие сталкивается с необходимостью сокращения сроков проектирования, улучшения качества и увеличения ассортимента разрабатываемых изделий и т. д. Решение этих и других задач невозможно без комплексного использования систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющих повысить эффективность проектно-конструкторских разработок. Создание таких систем сопровождается ставшими уже традиционными проблемами:

— многократно меняющиеся требованиями к функциональной части создаваемой САПР на всех этапах ее проектирования;

— наличием умолчаний и недокументированных соглашений, которые сложно выявить на ранних этапах создания САПР.

Одним из подходов к созданию САПР, позволяющих решить обозначенные проблемы, является разработанная на кафедре "Когнитивные технологии проектирования" МГТУ "Станкин" методология автоматизации интеллектуального труда (МАИТ). МАИТ представляет набор последовательно реализуемых процессов моделирования (анализ традиционного процесса решения предметных задач, концептуальное моделирование, инфологическое моделирование и даталогическое моделирование), в результате выполнения каждого происходит построение соответствующего модельного представления предметной задачи.

В настоящее время реализованы автоматизированные системы поддержки процессов анализа традиционного процесса решения предметных задач, концептуального моделирования и инфологического моделирования, поэтому актуальной становится задача создания среды поддержки управления этими процессами моделирования.

Для решения поставленной задачи необходимо произвести унификацию процессов моделирования, которая заключается в выявлении общих особенностей различных процессов моделирования. К таким особенностям относятся следующие.

1. *Наличие общего состава процедур моделирования.* Каждый процесс моделирования состоит из набора процедур. К их числу можно отнести:

— формирование начальной обобщенной модели под комплекс задач;

— формирование модели текущей задачи комплекса;

— анализ модели текущей задачи;

— дополнительную обработку модели текущей задачи;

— синтез модели текущей задачи с обобщенной моделью;

— дополнительную обработку обобщенной модели;

— документирование сформированных моделей.

Выполнение этих процедур происходит параллельно-последовательным образом.

2. *Единая классификация категорий пользователей.* Процесс создания САПР на базе МАИТ предполагает наличие различных категорий пользователей для выполнения рассмотренных процедур. Пользователи, работающие с системами поддержки процессов моделирования, подразделяются на три основные категории: администраторы, эксперты и аналитики.

Администратор системы осуществляет все действия, связанные с управлением проектами. Это ведение исполнителей и проектов, планирование сроков выполнения проектов в целом и по видам процедур, назначение исполнителей на работы (по видам процедур) и т. д.

Аналитик выполняет формирование спецификаций всех составляющих модели определенного процесса моделирования для отдельных предметных задач, а также осуществляет документирование компонентов модели.

Эксперт проводит анализ сформированных описаний, их дополнительную обработку и синтез описаний текущих задач с обобщенной моделью комплекса.

Кроме этого, наличие разных категорий пользователей обуславливает необходимость обмена информацией между ними. Таким образом, может передаваться информация, связанная с назначением

пользователя на вид работ, окончанием текущего вида работ, разного рода директивы и т. д. С этой целью в автоматизированной системе предусмотрен механизм, позволяющий обмениваться информацией как между пользователями системы, так и от системы к пользователю. Передаваемая информация может иметь разные уровни важности и защищенности. Существует возможность сохранения всех сообщений для последующего их просмотра администратором системы.

3. *Наличие двух уровней сложности модельного представления.* Первый уровень соответствует комплексу предметных задач, подлежащих автоматизации. Второй уровень соответствует отдельным задачам этого комплекса. Таким образом, необходима разработка среды управления, состоящей из двух подсистем (локальной и глобальной). Локальная подсистема позволяет аналитику осуществлять формирование локальной модели предметной задачи и ее документирование. Глобальная подсистема позволяет эксперту работать с комплексом предметных задач, выполнять все виды работ над ним и в дополнение к этому позволяет производить импорт локальной модели из локальной подсистемы с целью выполнения над этой моделью остальных процедур под контролем эксперта.

Таким образом, под проектом будем понимать процесс создания САПР, состоящий из последовательно выполняемых процессов моделирования, включающих рассмотренные процедуры над задачами и комплексами предметных задач, подлежащих автоматизации, с назначенными на них исполнителями.

4. *Организация пространства.* В целях обеспечения санкционированного доступа к данным по категориям пользователей организация размещения проектов в автоматизированной системе включает набор директорий с правами доступа к ним:

- рабочие директории (под отдельные задачи);
- текущая директория (под каждый комплекс в целом);
- архивная директория (под все законченные проекты);
- директория управления (для хранения управленческой статистики, необходимой для принятия управленческих решений).

5. *Возможность унификации задач управления.* Выявленные особенности процессов моделирования позволяют произвести следующую унификацию задач управления.

Планирование предоставляет возможность задать временные рамки проекта в целом и каждому его этапу, назначить исполнителей на каждый этап, выделить информационное пространство под проекты и задачи.

Контроль позволяет просматривать текущее состояние проекта для управления процессом моделирования с учетом загрузки исполнителей и планирования работ. Необходимость процедуры контроля обусловлена отсутствием среднестатистической информации при оценке трудоемкости проектов.

Учет обеспечивает получение различных статистических данных по загрузке исполнителей, фактическим срокам выполнения и др.

Анализ позволяет оценить успешность проекта в целом, определить соответствие плановых и фактических затрат, осуществить обработку накопленной статистики, сравнивая эффективность работы различных исполнителей по разным проектам, и др.

Корректировка позволяет изменять плановые сроки и состав исполнителей, переназначить исполнителя на работу и др.

Для создания среды управления проектами с учетом выявленных особенностей необходимо провести анализ существующих систем управления проектами для выбора наиболее подходящей системы, дальнейшая адаптация которой позволит реализовать все рассмотренные особенности. Оценку производят по следующим критериям:

- определение состава и последовательности выполнения работ;
- определение ресурсов, необходимых для выполнения работ;
- формирование календарного плана и определение критического пути;
- оптимизация календарного плана с учетом ограничений на ресурсы;
- расчет прогнозируемых показателей;
- русификация;
- наличие дополнительных пакетов, расширяющих базовые возможности программного обеспечения (ПО);
- возможности для импорта/экспорта.

Сравнительная характеристика программного обеспечения, используемого для управления проектами, приведена в таблице.

Анализ ПО, используемого для управления проектами, наглядно демонстрирует их ориентированность на решение широкого класса задач. Стремление сделать эти системы максимально функциональными привело к тому, что они стали сложны, а затраты на их установку и внедрение достаточно высоки. Следовательно, для процессов моделирования, у которых постоянно количество и последовательность работ, а также количество ресурсов управления, эффективнее использовать более простые и гибкие инструментальные средства.

При этом необходимо учесть, что разрабатываемая среда управления должна представлять интегрированную оболочку ("надстройку") над су-

Критерий	MS Project	Spider	Open Plan	Artemis Views
Определение состава и последовательности выполнения работ	+	+	+	+
Определение ресурсов, необходимых для выполнения работ	+	+	+	+
Формирование календарного плана и определение критического пути	+	+	+	+
Оптимизация календарного плана с учетом ограничений на ресурсы	+	+	+	+
Расчет прогнозируемых показателей	-	-	-	-
Русификация	+	+	+	-
Наличие дополнительных пакетов, расширяющих базовые возможности ПО	Standart, Professional, Server	Project Pro, Desktop	Enterprise, Professional, Desktop	ProjectView, ResourceView, TrackView, CostView
Возможности для импорта/экспорта	MS Excel, MS Access, FoxPro, ODBC, OLE, ASCII, CSV, Lotus, dBase	Формат CSV, Oracle, SQLServer, Access, Interbase, Lotus Notes	SQL, Oracle, Sybase, xBase	Oracle, SQLBase, SQLServer, Sybase

существующими системами поддержки процессов моделирования. Эта "надстройка" позволит по мере окончания процедур одного процесса моделирования в автоматическом режиме переходить на следующий, а также хранить все промежуточные версии сформированных модельных представлений. Кроме этого, за счет подобной интеграции возможно осуществление ряда функций в автоматизированном режиме. К их числу можно отнести размещение проектов в пространстве вычислительной среды, контроль выполнения сроков и учет временных затрат по отдельным видам работ и исполнителям и т. д. В этом заключаются преимущества разрабатываемых средств перед существующими системами управления проектами. Дело в том, что часть рассмотренных функций системы может быть получена именно за счет данной интеграции,

что невозможно получить развитием известных существующих систем управления проектами.

С учетом выявленных особенностей и анализа существующих систем управления проектами становится необходимой разработка специализированной среды управления проектами при создании САПР на базе МАИТ, которая, с одной стороны, позволит получить больший эффект по сравнению с существующими инструментальными средствами управления проектами за счет интеграции с системами поддержки процессов моделирования, а с другой — будет способствовать на основе накапливаемых статистических данных принятию более эффективных управленческих решений, уменьшению числа возникающих ошибок при осуществлении управленческих функций и в целом снижению трудоемкости процессов моделирования.

А. В. ИВАНЯЙСКИЙ, канд. техн. наук, **Ю. В. КОНСТАНТИНОВ**, канд. техн. наук,
В. А. ИВАНЯЙСКИЙ, канд. техн. наук
 Московский государственный открытый университет

Математическая модель присоединенной кавитации в жидкости

Закон сохранения энергии для стационарного течения несжимаемой ($\rho = \text{const}$) жидкости в поле тяготения описывается уравнением Бернулли

$$\frac{\rho v^2}{2} + p + \rho g z = \text{const.}$$

Из него следует, что при достижении определенной скорости давление жидкости должно было стать отрицательным, на самом деле этого не происходит, так как жидкость теряет сплошность и

в ней возникают полости — так называемая кавитация [1].

Будем исходить из того, что давление в жидкости не может быть отрицательным. Рассмотрим модельную задачу определения критической скорости жидкости, при которой возникает кавитация. Пусть вязкая несжимаемая жидкость заключена между двумя коаксиальными бесконечными цилиндрами, причем внешний цилиндр является неподвижным, а внутренний вращается вокруг своей оси с угловой скоростью Ω . Радиусы цилиндров R_1 и R_2

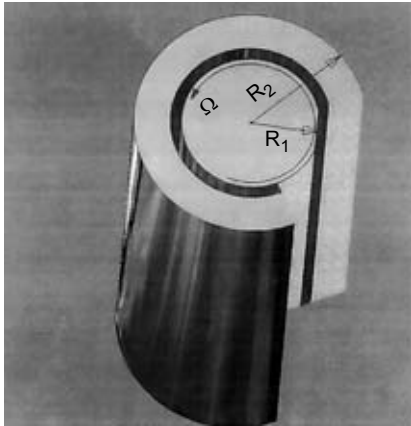


Рис. 1. Расчетная схема математической модели присоединенной кавитации

($R_2 > R_1$). Требуется определить линейную скорость жидкости, соприкасающейся с поверхностью внутреннего цилиндра, при которой вблизи этой поверхности возникает область кавитации (рис. 1).

Как известно [2], движение вязкой несжимаемой жидкости описывается уравнениями Навье—Стокса и условием несжимаемости соответственно

$$\frac{dv}{dt} - F = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta v; \quad \text{div } v = 0,$$

которые представляют замкнутую систему дифференциальных уравнений для вектора скорости v и давления p ; $\rho = \text{const}$ — плотность жидкости; ν — кинематический коэффициент вязкости, равный $\frac{\mu}{\rho}$ ($\mu = \text{const}$ — коэффициент сдвиговой вязкости).

Эти уравнения в цилиндрических координатах r, φ, z имеют вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} = \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \right. \\ & \quad \left. - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{v_r}{r^2} \right); \\ & \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_r v_\varphi}{r} = \\ & = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \\ & + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right); \\ & \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0, \end{aligned}$$

где v_r, v_φ, v_z — проекции вектора скорости на оси цилиндрической системы координат.

Выберем цилиндрические координаты r, φ, z с осью Z по оси цилиндров. Если принять

$$v_z \equiv v_r \equiv 0; \quad v_\varphi = v(r); \quad p = p(r),$$

то уравнение неразрывности удовлетворяется тождественно, а уравнения Навье—Стокса в цилиндрических координатах в данном случае примут вид

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{v^2}{r}; \quad (1)$$

$$\frac{d^2 v}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv}{dr} - \frac{v}{r^2} = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) имеет общее решение

$$v = C_1 r + \frac{C_2}{r}. \quad (3)$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 определим из граничных условий

$$v(R_1) \equiv v_1 = \Omega R_1; \quad v(R_2) = 0.$$

В результате получим следующее выражение:

$$v = v_1 \frac{R_1}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right). \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в уравнение (1) и интегрируя по r , получим

$$p = \rho \frac{v_1^2 R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} \left(\frac{r^2}{2} - \frac{R_2^4}{2r^2} - 2R_2^2 \ln r \right) + C_3. \quad (5)$$

Пусть при $r = R_1$ $p = p_1$, тогда

$$C_3 = p_1 - \rho \frac{v_1^2 R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} \left(\frac{R_1^2}{2} - \frac{R_2^4}{2R_1^2} - 2R_2^2 \ln R_1 \right).$$

Подставляя выражение для C_3 в формулу (5), определим давление

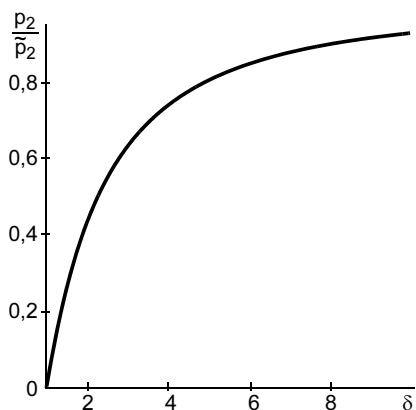


Рис. 2. Зависимость p_2/p_1 от δ

$$p = p_1 \frac{v_1^2 R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} \left(\frac{r^2 - R_1^2}{2} + \frac{R_2^4}{2} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{r^2} \right) - 2R_2^2 \ln \frac{r}{R_1} \right) + p_1. \quad (6)$$

Давление при $r = R_2$, как это следует из формулы (6), составит

$$p_2 = p_1 \frac{v_1^2}{(\delta^2 - 1)^2} \left(\frac{\delta^4 - 1}{2} - 2\delta^2 \ln \delta \right) + p_1, \quad (7)$$

где δ — безразмерный геометрический параметр, равный R_2/R_1 .

Обозначим критическое значение скорости, при которой давление $p_1 = 0$, через v_{cr} , тогда соответствующее давление при $r = R_2$

$$p_2 = p_1 \frac{v_{cr}^2}{(\delta^2 - 1)^2} \left(\frac{\delta^4 - 1}{2} - 2\delta^2 \ln \delta \right). \quad (8)$$

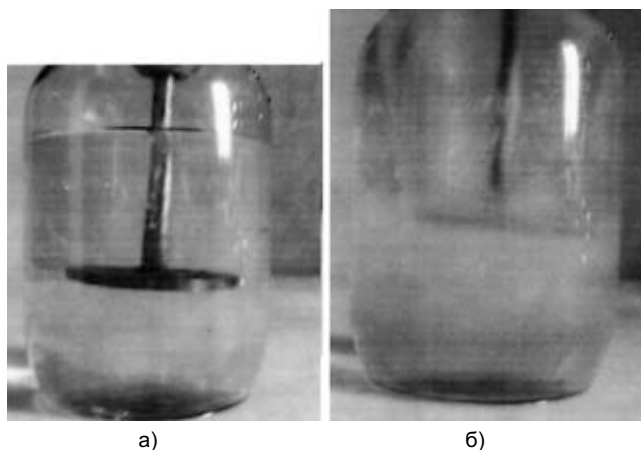


Рис. 3. Характерная картина протекания присоединенной кавитации в жидкости: а — исходное состояние; б — присоединенная кавитация

При $R_2 \gg R_1$ $\delta \gg 1$, поэтому из выражения (8) следует

$$p_2 = \frac{\rho v_{cr}^2}{2}, \quad (9)$$

где p_2 — соответствующее давление.

Из равенства (9) получим критическую скорость

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{2p_2}{\rho}}. \quad (10)$$

Из выражений (8) и (9) получим

$$p_2 = \frac{2}{(\delta^2 - 1)^2} (\delta^4 - 1 - 4\delta^2 \ln \delta).$$

Зависимость безразмерного давления $\frac{p_2}{p_1}$ от безразмерного параметра δ приведена на рис. 2.

Таким образом, при достижении линейной скорости на поверхности внутреннего цилиндра критического значения вблизи этой поверхности возникает область кавитации, которая по мере дальнейшего возрастания скорости v_1 увеличивается в размерах (рис. 3).

Определим критический момент сил трения, который необходимо приложить к внутреннему цилиндру для достижения критической скорости.

С учетом выражения (4) находим

$$\begin{aligned} \sigma_{r\varphi}|_{r=R_1} &= \mu \left(\frac{dv}{dr} - \frac{v}{r} \right) \Big|_{r=R_1} = \\ &= -2\mu \frac{v_1 R_2^2}{R_1 (R_2^2 - R_1^2)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Силу трения, действующую на поверхности единицы длины цилиндра, получим умножением на $2\pi R_1$, а момент M_1 этих сил — умножением еще на R_1 .

В результате получим

$$M_1 = - \frac{4\pi \delta^2 \mu v_1 R_1}{(\delta^2 - 1)}. \quad (12)$$

Тогда критический момент составит

$$M_{1cr} = - \frac{4\pi \delta^2 \mu R_1}{(\delta^2 - 1)}. \quad (13)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1965. 616 с.
2. Ламб Г. Гидродинамика. М.: ГИТТЛ, 1947. 925 с.

А. В. ЦАРЬКОВ, д-р техн. наук, В. А. РАЕВСКИЙ, инж.
Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана

Оптимизация режимов сварки трубных досок теплообменных аппаратов методами компьютерного моделирования

Сварное соединение типа труба — трубная доска является неотъемлемым ответственным конструктивным элементом всех теплообменных аппаратов. При сварке среди большого количества контролируемых параметров, как правило, наиболее значимыми являются глубина проплавления по стыку и величина наплыва (рис. 1) внутри ввариваемой трубки. В настоящее время, учитывая высокие требования к стабильности процесса сварки, на отечественных заводах чаще всего применяют аппаратуру известных зарубежных производителей (ESAB Int. AB, Kemppi OY, Fronius, Polysoud, Messer Cutting & Welding AG и др.).

Как правило, при изготовлении конструкций из тонких трубок применяют импульсно-дуговую сварку (ИДС) неплавящимся электродом. Такой процесс позволяет повысить концентрацию нагрева за счет увеличения сосредоточенности теплоты дуги, что благоприятно сказывается на снижении временных и остаточных сварочных напряжений. Варьируя ток, скорость, а также длительность импульса и паузы, можно в широких пределах изменять параметры шва. Большинство западных фирм осуществляют одновременную поставку сварочного оборудования и технологии, что, казалось бы, должно избавить потребителей от необходимости отработки режимов сварки. Вместе с тем в ряде отечественных отраслей промышленности требования к трубным соединениям значительно превосходят аналогичные зарубежные стандарты. Например, в отечественной атомной промышленности

требуемая глубина проплавления при сварке трубных решеток из аустенитной стали (рис. 1) превосходит значение, указанное в ряде зарубежных стандартов, почти в 2 раза. Таким образом, возникает ситуация, когда необходимо проведение дополнительных исследовательских работ с целью оптимизации существующей технологии. С учетом большого числа существующих типоразмеров труб, вариантов их компоновки в трубном пучке и набивки в трубные доски (рис. 2) экспериментальная отработка конкретных режимов сварки превращается в самостоятельную, довольно трудоемкую задачу.

В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования при оптимизации параметров сварки труб с трубной доской (см. рис. 1). В качестве основного параметра оптимизации (функции отклика) используется максимальная глубина проплавления H , а другие конструктивные параметры (величина наплыва, отсутствие пор, сплошность шва, стабильность проплавления и др.) рассматриваются в качестве ограничений.

ИДС отличается более широким диапазоном регулирования теплового воздействия источника теплоты на металл по сравнению с аргонодуговой сваркой. Это связано с тем, что высокая концентрация тепловой энергии за период импульса обеспечивает более эффективное расплавление свариваемого металла. При автоматической сварке в импульсном режиме шов формируется периодическим расплавлением отдельных точек с шагом S , величина которого зависит от скорости перемеще-

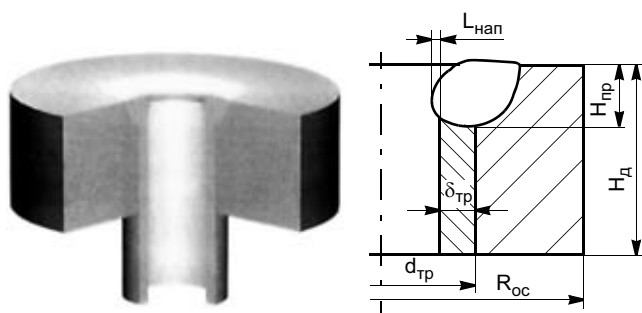


Рис. 1. Заводской опытный образец для подбора оптимальных режимов сварки

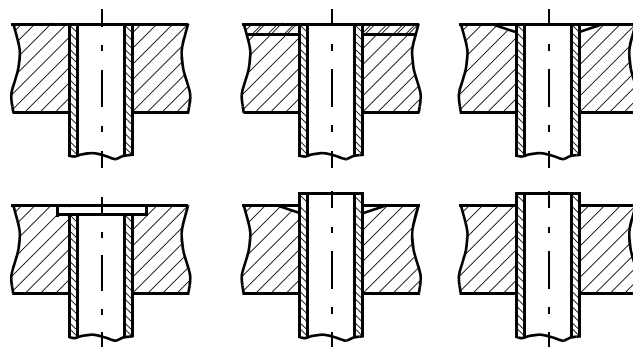


Рис. 2. Типовые виды сварных соединений "труба — трубная доска"

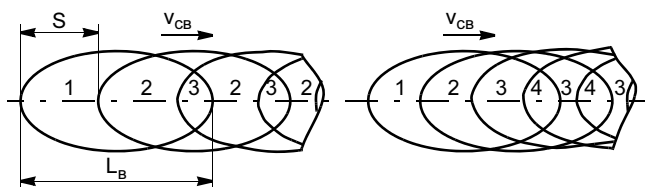


Рис. 3. Схема перекрытия сварных точек для различных скоростей сварки при импульсно-дуговом процессе

ния источника нагрева и продолжительности цикла сварки (рис. 3). Степень перекрытия точек определяется их размером L_B и шагом S :

$$P = \frac{S}{L_B} \tag{1}$$

Для получения равномерного профиля шва со стабильным проваром, без кратеров и дефектов усадочного характера перекрытие точек принимается большим половины длины L_B отдельной сварной точки (см. рис. 3). Однако завышенное перекрытие точек или уменьшенный их шаг обуславливает многократное и бесполезное переплавление, что влияет на свойства металла шва и производительность процесса [1].

Как показано в работе [1], с точки зрения минимального суммарного переплавления точки по площади и обеспечения наибольшей стабильности физико-химических свойств металла наибольший интерес представляют режимы ИДС с шагом точек $S = 0,25 \div 0,444 L_B$.

Кроме того, чрезвычайно важно, что применение ИДС способствует уменьшению пористости в швах по сравнению со швами, полученными при сварке непрерывной дугой [2].

Математическая модель

Расчет температурных полей выполняли на базе трехмерного уравнения теплопроводности, записанного в цилиндрической системе координат:

$$c\gamma(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial R} i_R + \lambda(T) \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial \varphi} i_\varphi + \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} i_z \right) + Q(R, \varphi, z) \tag{2}$$

Сварочная дуга рассматривается как поверхностный нормально распределенный источник, описываемый известным математическим выражением

$$q_{2m} = \frac{I_{св} U_D \eta_{эф} k}{\pi} e^{-kr^2} \tag{3}$$

где q_{2m} — удельная плотность мощности; $I_{св}$ — ток; U_D — напряжение дуги; $\eta_{эф}$ — эффективный кпд; k — коэффициент сосредоточенности дуги.

Калориметрические исследования [3] показывают, что значение эффективного кпд дуги для импульсного процесса составляет 80—85 %. В расчетах $\eta_{эф}$ принимали равным 80 %. Коэффициент сосредоточенности k определяли расчетно-экспериментальным путем исходя из совпадения расчетного контура сварочной ванны с контуром на шлифе в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В качестве граничных условий принимали граничные условия третьего рода. Коэффициент теплоотдачи [4]

$$\alpha(T) = 2,4 \cdot 10^{-3} \varepsilon(T) T^{1,61} \tag{4}$$

где $\varepsilon(T)$ — коэффициент поверхностной термоэмиссии.

Материал изделия — коррозионно-стойкая сталь, часто применяемая в подобных конструкциях. Свойства стали принимали согласно данным, приведенным в работе [5]. Расчеты проводили с учетом скрытой теплоты плавления и зависимости теплофизических свойств от температуры. Теплоперенос в сварочной ванне учитывали с помощью эффективного коэффициента теплопроводности

$$\lambda_{эф} \approx \varepsilon_k \lambda, \tag{5}$$

где λ — молекулярная теплопроводность жидкого металла; ε_k — коэффициент конвективной составляющей.

Согласно методике расчета работы [6], ε_k рассматривается как случайная нормально распределенная величина. Диапазон изменения ε_k при сварке листов из коррозионно-стойкой стали принимали в пределах 1,05—4,8 [7].

Расчет формы и величины наплыва выполняли по методике работы [8], согласно которой положение каждой точки свободной поверхности сварочной ванны описывается уравнением

$$\sigma \frac{\partial^2 Z / \partial R^2}{\sqrt{[1 + (\partial Z / \partial R)^2]^3}} = \rho g Z_m \tag{6}$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; R — координата поверхности по оси R ; ρ — плотность расплава, зависящая от температуры; g — ускорение свободного падения; Z_m — металлостатическая высота.

Решение данного дифференциального уравнения после подстановки $r = R/a_k, z = Z/a_k, a_k = \sqrt{\sigma / (g\rho)}$

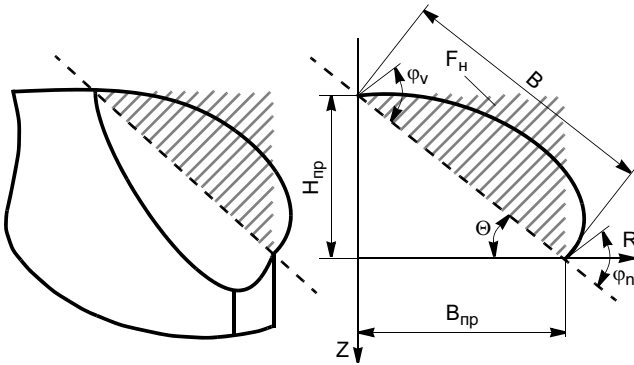


Рис. 4. Схема формирования свободной поверхности сварочной ванны

в параметрической форме имеет вид интегральных S-кривых (рис. 4):

$$z^2 = z_0^2 + 2(1 - \cos(\varphi)); \quad (7)$$

$$R = \int_0^\varphi \frac{\cos(\varphi) d\varphi}{\sqrt{z_0^2 + 2(1 - \cos(\varphi))}}$$

или S-кривых [8]:

$$z^2 = 2(\cos(\varphi) - \cos(\varphi_0)); \quad (8)$$

$$R = \int_0^\varphi \frac{\cos(\varphi) d\varphi}{\sqrt{2(\cos(\varphi) - \cos(\varphi_0))}}$$

В качестве граничных условий выбирали площадь сечения наплавленного металла F_n и ширину шва B , безразмерные аналоги которых определяются по формулам $b_0 = B/a_k$ и $f_0 = F_n/a_k$.

Для S-кривых решение имеет вид следующей системы уравнений:

$$b_0 \cos(\Theta) = \int_0^{\varphi_n} \frac{\cos(\varphi) d\varphi}{\sqrt{z_0^2 + 2(1 - \cos(\varphi))}} - \int_0^{\varphi_v} \frac{\cos(\varphi) d\varphi}{\sqrt{z_0^2 + 2(1 - \cos(\varphi))}}; \quad (9)$$

$$b_0 \sin(\Theta) = \sqrt{z_0^2 + 2(1 - \cos(\varphi_n))} - \sqrt{z_0^2 + 2(1 - \cos(\varphi_v))};$$

$$f_0 \sin(\Theta) = \cos(\Theta - \varphi_v) - \cos(\varphi_n - \Theta),$$

для S-кривых:

$$b_0 \cos(\Theta) = \int_{\varphi_0}^{\varphi_n} \frac{\cos(\varphi) d\varphi}{\sqrt{2(\cos(\varphi) - \cos(\varphi_0))}} \pm \int_{\varphi_0}^{\varphi_v} \frac{\cos(\varphi) d\varphi}{\sqrt{2(\cos(\varphi) - \cos(\varphi_0))}}; \quad (10)$$

$$b_0 \sin(\Theta) = \sqrt{2(\cos(\varphi_n) - \cos(\varphi_0))} \pm \sqrt{2(\cos(\varphi_v) - \cos(\varphi_0))};$$

$$f_0 \sin(\Theta) = \cos(\Theta + \varphi_n) - \cos(\varphi_v + \Theta).$$

Если $b_0 \sin(\Theta) > 2$, то использовали систему уравнений для S-кривых, в противном случае — для C-кривых.

Численная реализация модели

Численную реализацию математической модели осуществляли методом конечных разностей. Конечно-разностная сетка имеет две области: с постоянным шагом в области высоких градиентов температур и с переменным вдоль осей R и Z в области низких градиентов температур, изменяющимся по геометрической прогрессии (рис. 5).

Решение задачи теплопереноса осуществляли по неявной разностной схеме методом теплового

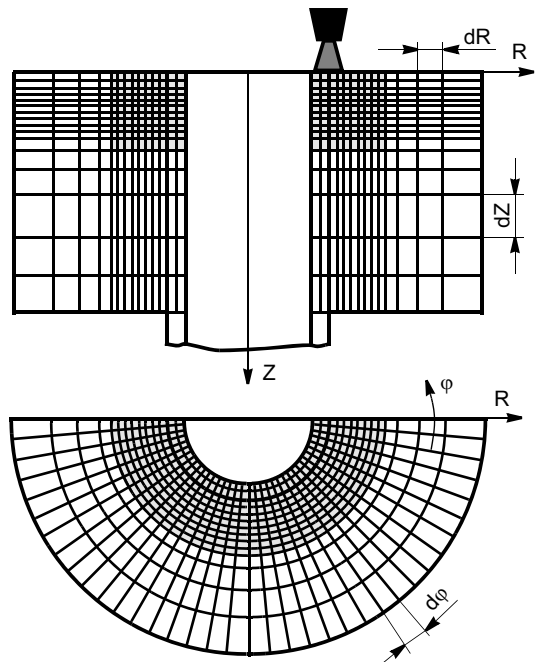


Рис. 5. Конечно-разностная модель трубного соединения

баланса. На границе тела принимали обычные граничные условия 3-го рода:

$$\left[\mp \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha(T)(T - T_0) \right]_{z=0} = q(r, \varphi, t); \quad (11)$$

$$\left[\mp \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha(T)(T - T_0) \right]_{z=H} = 0;$$

$$\left[\mp \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha(T)(T - T_0) \right]_{z=0, R} = 0,$$

где $\alpha(T)$ — эффективный коэффициент теплоотдачи, включающий потери на радиацию и конвекцию, вычисляемый по формуле (4).

Задачу решали в квазилинейной постановке по времени, системы разностных уравнений — методом прогонки вдоль осей R и Z , учитывая замкнутость расчетной сетки, вдоль оси φ — методом циклической прогонки.

Так как процесс носит импульсный характер, в расчете использовали как точное значение сварочного тока, так и среднеинтегральное за цикл "период паузы + период импульса":

$$I_{св} = \frac{\int_0^{t_{им} + t_{пз}} I(t) dt}{t_{им} + t_{пз}} = \frac{t_{им} I_{им} + t_{пз} I_{пз}}{t_{им} + t_{пз}}. \quad (12)$$

Необходимость введения среднеинтегрального значения тока возникает при малых значениях времени импульса и паузы (менее 0,1 с), так как при ре-

ализации модели шаг по времени не должен превышать этих значений, поскольку это приведет к недопустимо высоким затратам машинного времени.

Коэффициент теплопроводности в общем случае определяется по следующим формулам:

если металл находится в твердой фазе,

$$\lambda_{эф}(T) = \lambda(T);$$

если металл находится в жидкой фазе,

$$\lambda_{эф}(T) \approx \varepsilon_k \lambda(T).$$

Фазовые превращения, которые имеют место при плавлении и кристаллизации, определяются по уравнению скорости образования жидкой фазы

$$C'_{ж} = R_{т \rightarrow ж} C_{т} - R_{ж \rightarrow т} C_{ж}, \quad (13)$$

где $R_{т \rightarrow ж}$, $R_{ж \rightarrow т}$ — температурозависимые скорости превращения твердой фазы в жидкую и жидкой в твердую соответственно; $C_{т}$, $C_{ж}$ — концентрации твердой и жидкой фаз.

Скорость образования жидкой фазы $C'_{ж}$ рассчитывается только в области между изотермами ликвидуса T_{liq} и солидуса T_{sol} :

если $T \leq T_{sol}$, $C_{ж} = 0$ и $C'_{ж} = 0$;

если $T \geq T_{liq}$, $C_{ж} = 1$ и $C'_{ж} = 0$.

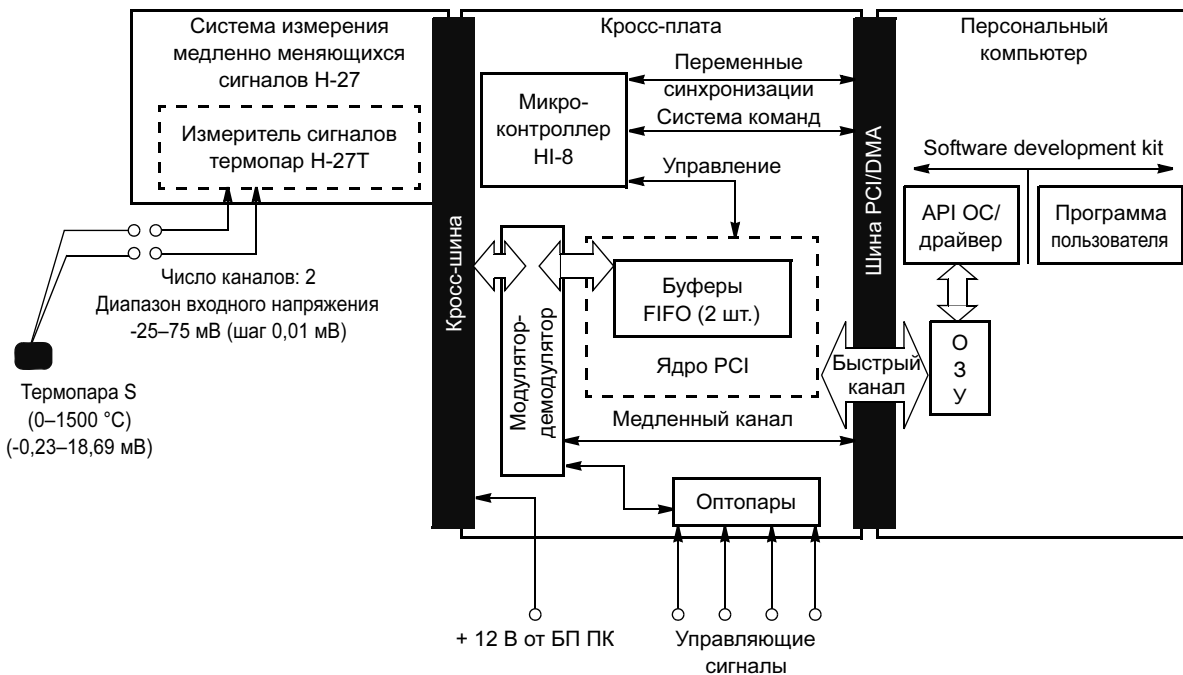


Рис. 6. Принципиальная схема установки сбора информации

Как следствие, в модели учитываются локальные эффекты выделения и поглощения теплоты:

$$T_{sol} \leq T \leq T_{liq};$$

$$Q = Q - \Delta Q C'_{ж} \Delta t, \quad (14)$$

полная величина которых (при изменении $C_{ж}$ от 0 до 1) в точности совпадает со значением скрытой теплоты плавления ΔL .

Алгоритм реализован в среде Compaq Visual Fortran. Программа имеет модульную структуру "Пре-процессор — Процессор — Пост-процессор". Пре-процессор в текстовом режиме реализует ввод исходных данных. Процессор предназначен для реализации математических подмоделей и также выполнен в виде подпрограмм. Пост-процессор реализует подготовку для визуализации и возможной последующей обработки.

Экспериментальная верификация модели

Верификацию математических моделей осуществляли на заводских опытных образцах ($\delta_{тр} = 1$ мм, $d_{тр} = 12$ мм, $R_{дс} = 30$ мм, $H_{дс} = 30$ мм (см. рис. 1)) из стали 12X18H10T путем сопоставления величин наплыва и зоны расплавления, полученных расчетным и экспериментальным путем, а также сравнением параметров термических циклов в различных зонах ОШЗ. Изображение шлифов получали, используя высокоточный планшетный сканер Microtek ScanMaker 6800. Измерение параметров термических циклов проводили на установке сбора информации, принципиальная схема которой приведена на рис. 6.

При выполнении экспериментов варьировали ток и длительность импульса, длительность паузы, скорость сварки и положение электрода относительно стыка "труба — трубная доска". В целом результаты численных экспериментов хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 7),

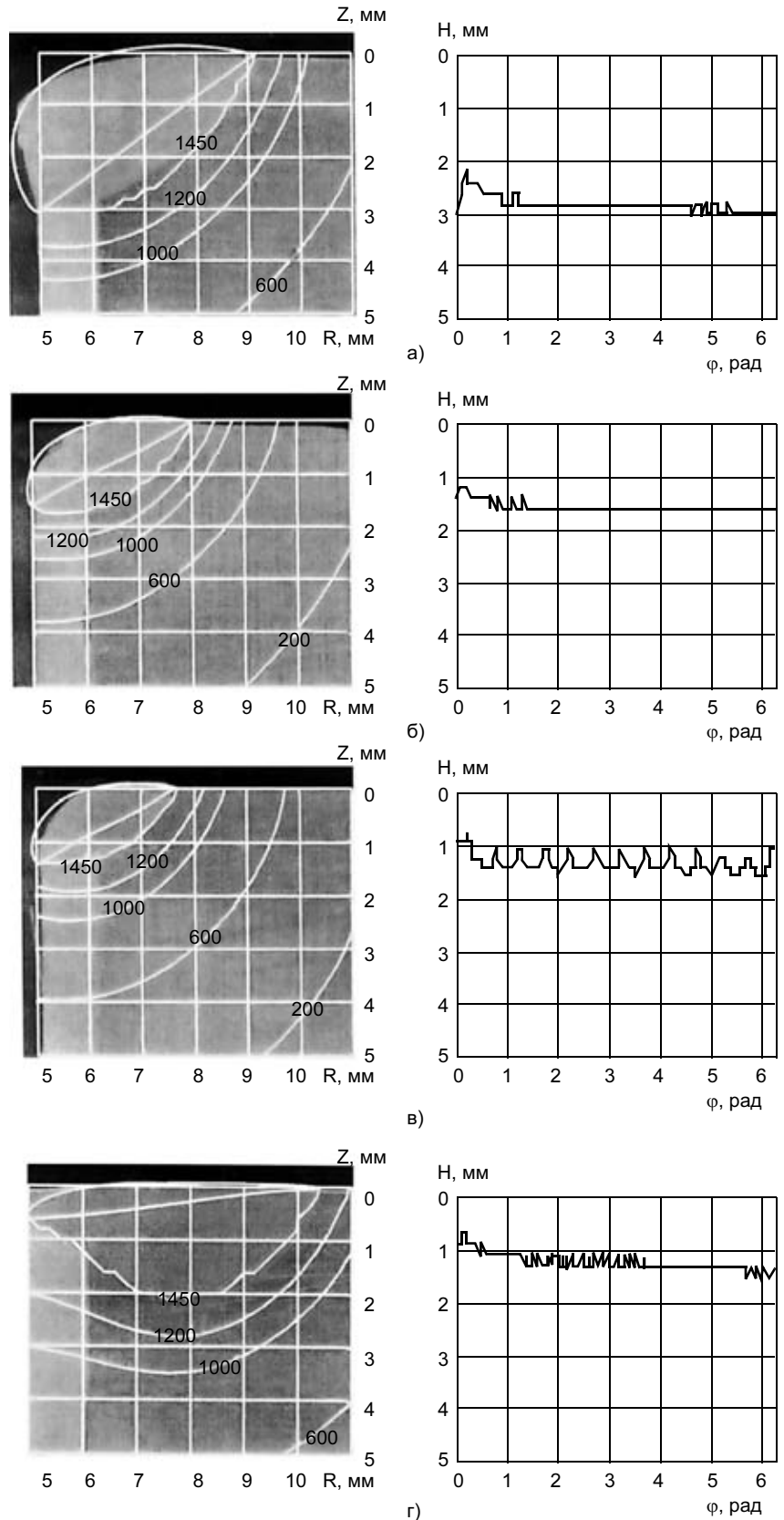


Рис. 7. Результаты верификации математических моделей

что подтверждает адекватность разработанной численной модели.

Численный эксперимент

При проведении численного эксперимента в качестве варьируемых факторов использовали ток и длительность импульса, длительность периода и скорость сварки. Длительность паузы

вводится опосредованно через длительность импульса и периода. Предварительные исследования позволили исключить из числа факторов положение электрода относительно стыка "труба — трубная доска"; этот вывод полностью согласуется с данными работы [9]. В качестве основной функции отклика использовали глубину проплавления, максимальное значение которой определяли методом крутого восхождения.

№ п/п	Примечание	$I_{им}, A$	$v_{св}, мм/с$	$t_{им}, с$	$T_{пер}, с$	$H_{пр}, мм$	$\delta H_{пр}, мм$	$\Sigma L_{нап}, мм$	P
Численный эксперимент									
0	Нулевой уровень	90	2,0	0,5	1,0				
1	Интервал варьирования	10	0,5	0,2	0,2				
+1	Верхний уровень	100	2,5	0,7	1,2				
-1	Нижний уровень	80	1,5	0,3	0,8				
1		-1	-1	-1	-1	1,8	0	0,3	0,34
2		+1	-1	+1	-1	2,8	0	1,0	0,29
3		-1	-1	+1	+1	2,2	0	0,5	0,5
4		-1	+1	-1	+1	1,2	0,8	0,2	0,63
5		+1	+1	-1	-1	1,8	0,2	0,3	0,43
6		+1	-1	-1	+1	2,0	0	0,3	0,38
7		-1	+1	+1	-1	1,8	0	0,3	0,38
8		+1	+1	+1	+1	2,0	0,4	0,4	0,5
h_j	$h_0 = 1,025$	0,02	-0,5	1,25	-0,5				
$h_j \times I_j$		0,2	-0,25	0,2	-0,1				
	Шаг при изменении $I_{им}$ на 5	5	-4	5	-10				
δh_j	$\delta h_0 = -0,775$	0	0,3	-0,25	0,5				
$\delta h_j \times I_j$		0	0,15	-0,05	0,1				
ΣI_j	$\Sigma I_0 = 0,044$	$9 \cdot 10^{-3}$	-0,225	0,688	-0,312				
$\Sigma I_j \times I_j$		0,09	0,113	0,138	-0,062				
ρ_j	$\rho_0 = 0,176$	$-3 \cdot 10^{-3}$	0,1	-0,069	0,356				
$\rho_j \times I_j$		-0,03	0,05	0,01	0,07				
Регрессионные уравнения									
$H_{пр} = 1,03 + 0,02I_{им} - 0,5v_{св} + 1,25t_{им} - 0,5T$									
$\delta H_{пр} = -0,08 + 0,3v_{св} - 0,25t_{им} + 0,5T$									
$\Sigma L_{нап} = 0,044 + 0,009I_{им} - 0,225v_{св} + 0,688t_{им} - 0,312T$									
$P = 0,176 - 0,003I_{им} + 0,1v_{св} - 0,069t_{им} + 0,356T$									
Данные, полученные регрессионным анализом									
1		100	2,0	0,5	1,0	2,15	0,2	0,5	0,40
2		95	2,0	0,5	1,0	2,05	0,2	0,5	0,42
3		90	2,0	0,5	1,0	1,95	0,2	0,4	0,43
4		85	2,0	0,5	1,0	1,85	0,2	0,4	0,45
5		80	2,0	0,5	1,0	1,75	0,2	0,3	0,46

При проведении численного эксперимента выявили две трудности. Первая — наличие трех ограничивающих параметров: величины наплыва на внутреннюю поверхность трубы, колебания глубины проплавления, степени перекрытия сварных точек. Вторая — естественные ограничения интервалов варьирования некоторых факторов (длительности импульса и периода).

Поэтому численный эксперимент проводили в два этапа. На первом определяли область варьируемых факторов, при которых получают требуемые значения глубины проплавления, колебаний глубины проплавления, степени перекрытия сварных точек; величину наплыва не анализировали. На втором этапе проводили анализ всех перечисленных факторов и строили регрессионные модели (см. таблицу).

Согласно полученным результатам, на глубину проплавления по стыку в первую очередь влияют скорость сварки, ток и время импульса, а длительность периода — наименее существенно. Волнистость корня шва в первую очередь зависит от скорости сварки и длительности периода. Увеличение этих параметров режима сварки вызывает увеличение волнистости; в меньшей мере влияет длительность импульса — с ростом времени импульса волнистость уменьшается. Влияние тока импульса выявлено не было. В наибольшей мере на величину наплыва влияют ток и время импульса и скорость сварки. Увеличение времени и тока импульса ведет к существенному увеличению величины наплыва, повышение скорости сварки, наоборот, — к уменьшению. Наибольшее влияние на степень перекрытия оказывают скорость сварки и длительность периода — увеличение этих параметров режима сварки приводит к резкому уменьшению степени перекрытия. В меньшей мере влияют ток и время импульса. Увеличение этих параметров соответственно увеличивает степень перекрытия сварных точек. На основании полученных результатов определен оптимальный режим сварки для

трубы размером 12×1 мм из стали 12X18H10T: $I_{им} = 95$ А, $v_{св} = 2$ мм/с, $t_{им} = 0,5$ с, $T_{пер} = 1,0$ с.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель нестационарной двухфазной задачи теплопроводности при импульсной дуговой сварке труб с трубными досками. Экспериментальная верификация подтвердила адекватность полученной модели.

2. Разработанная модель сварки труб с трубными досками позволяет определить параметры процесса импульсной сварки, при которых обеспечиваются максимальная глубина проплавления и величина наплыва, не превышающая заданную.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудко Д. А., Шнайдер Б. И., Погребиский Д. М. Перекрытие точек при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом // Автоматическая сварка. 1975. № 8. С. 45—49.
2. Вагнер Ф. А., Степанов В. В. Выбор параметров режима сварки пульсирующей дугой и их влияние на свойства сварных соединений // Сварочное производство. 1968. № 5. С. 14—16.
3. Tsai N. S., Eagar N. W. Distribution of the heat and current fluxes in gas tungsten arc // Metallurgical Transaction. 1985. N 12. P. 841—846.
4. Vinokurov V. A. Welding Stresses and Distortions / Translated by J. E. Baker. The British Library, Lending Division, 1977. P. 118—119.
5. Miettinen J. Calculation of Solidification Related Thermophysical Properties for Steels // Metals and Materials Transactions. 1986. Vol. 9B. P. 587—600.
6. Numerical Simulation on Transformation Process during Multi-Pass Tig Welding / A. V. Tsarkov, G. P. Pantuhov, N. E. Hannerz, P. Kihlmark // Mathematical Modelling of Weld Phenomena. 2005. N 7. P. 219—234.
7. Славин Г. А., Трохинская Н. М. О связи тепловых и гидродинамических процессов в ванне при сварке непрерывно горячей дугой тонколистовых материалов // Сварочное производство. 1983. № 4. С. 4—6.
8. Березовский Б. М. Математическое моделирование формирования горизонтальных швов на наклонной плоскости // Автоматическая сварка. 1988. № 1. С. 26—31.
9. Степанов В. И. Изготовление теплообменного аппарата с использованием титановых сплавов // Сварочное производство. 2001. № 5. С. 53—57.

В. В. СМИРНОВ, д-р техн. наук, председатель ТК-364, член ИСО ТК-44,
В. А. КАЗАКОВ, д-р техн. наук (ОАО «Издательство «Машиностроение»),
О. А. ЦУКУРОВ, канд. техн. наук, зам. председателя ТК-364, член ИСО ТК-44

Деятельность технического комитета по стандартизации «Сварка и родственные процессы» (ТК-364) по выполнению закона РФ «О техническом регулировании»

Работа ТК-364 по реализации закона РФ «О техническом регулировании» сосредоточена на следующих направлениях:

- проведение информационных семинаров и лекций для разработчиков и потенциальных пользователей специальных технических регламентов (СТР) и национальных стандартов по основам формирования и выполнения СТР на продукцию, безопасность которой определяется технологическими процессами сварки;

- составление номенклатуры и разработка необходимых национальных стандартов по сварке и родственным процессам, гармонизированных с международными аналогами, для перечня стандартов, взаимосвязанных с вышеуказанными СТР;

- изучение, обсуждение и экспертиза проектов СТР на продукцию, безопасность которой определяется технологическими процессами сварки;

- участие в работе комитета РСПП по техническому регулированию, стандартизации и оценке соответствия и экспертных комиссий;

- разработка методических рекомендаций по формированию проектов СТР на продукцию, безопасность которой определяется технологическими процессами сварки;

- разработка методических рекомендаций по выполнению изготовителями конечной продукции общих требований СТР с использованием стандартов, взаимосвязанных с техническими регламентами.

Рассмотрим основные направления деятельности.

Стандартизация

В обновленной программе разработки технических регламентов, принятой постановлением Правительства РФ от 29 мая 2006 г. № 781-р, предусмотрено создание более 30 СТР на продукцию, безопасность которой определяется технологическими процессами сварки. К настоящему времени в разработке находятся почти все запланированные СТР, связанные со сваркой. Эти регламенты устанавливают требования безопасности к широкому спектру групп однородной продукции в энергетике (электроэнергетике, ядерной энергетике, нефтегазовом комплексе), промышленности, строительстве, транспорте (автомобильном, железнодорожном, воздушном, водном), космической деятельности.

С учетом этого обстоятельства специалисты ТК-364 провели анализ состояния действующих в области сварки отечественных, межгосударственных стандартов, стандартов Украины и Республики Беларусь, взаимосвязанных с техническими регламентами этих стран, а также стандартов, связанных с европейскими директивами «Нового подхода» и установили следующее:

- из действующих 190 российских национальных стандартов (ОКС 25.160.01-25.160.50) введены в действие в период с 1995 по 2006 г. 25 стандартов (<http://interstandart.ru>) (в разной степени готовности находятся 22 проекта национальных стандартов);

- национальных стандартов, гармонизированных с действующими европейскими и международными аналогами, в рассматриваемой области насчитывается единицы;

- в базе действующих национальных стандартов РФ отсутствуют целые группы стандартов, применяемых в странах СНГ и ЕС и взаимосвязанных соответственно с техническими регламентами или нижеследующими директивами, которые устанавливают требования к сварщикам и руководителям сварочных работ, квалификации сварочных технологий, формированию отдельных элементов сварочного производства, менеджменту качества при проведении сварочных работ и т. п.;

- действующих европейских стандартов в области сварки и родственных процессов, взаимосвязанных с директивами ЕС, например, 97/23/ЕС «Оборудование, работающее под давлением», насчитывается около 120 наименований, 73/23/ЕЕС «Низковольтное электрооборудование» — 12, 89/336/ЕЕС «Электромагнитная совместимость» — 2;

- в межгосударственном техническом комитете по стандартизации «Сварка и родственные процессы» (МТК-72) разработаны около 20 межгосударственных стандартов в области сварки, гармонизированных с зарубежными аналогами и взаимосвязанных с формируемыми межгосударственными техническими регламентами;

- в Республике Беларусь и Украине разработаны от 50 до 70 национальных стандартов, гармонизированных

с европейскими аналогами и связанных с названными европейскими директивами.

На основании изложенного можно констатировать, что существующая отечественная нормативная база стандартов в области сварки и родственных процессов не соответствует сложившейся международной практике и требованиям ФЗ «О техническом регулировании». И по этим причинам она не может быть использована без обновления как для выполнения общих требований в разрабатываемых СТР (к сварным соединениям, аттестации сварочного персонала и квалификации технологических процессов), так и в процедурах подтверждения соответствия.

По нашим оценкам, для формируемых отечественных СТР на продукцию, безопасность которой определяется технологическими процессами сварки, необходимо подготовить 80—90 национальных стандартов РФ, гармонизированных с межгосударственными, европейскими и международными аналогами.

В условиях ограниченности бюджетного финансирования модернизацию отечественной нормативной базы в области сварки целесообразно проводить путем разработки (подготовки) в первую очередь национальных стандартов, взаимосвязанных с будущими СТР и гармонизированных с межгосударственными, европейскими и международными аналогами (80—90 единиц), в том числе путем:

— собственных разработок за счет бюджетного финансирования (30—40 ед.);

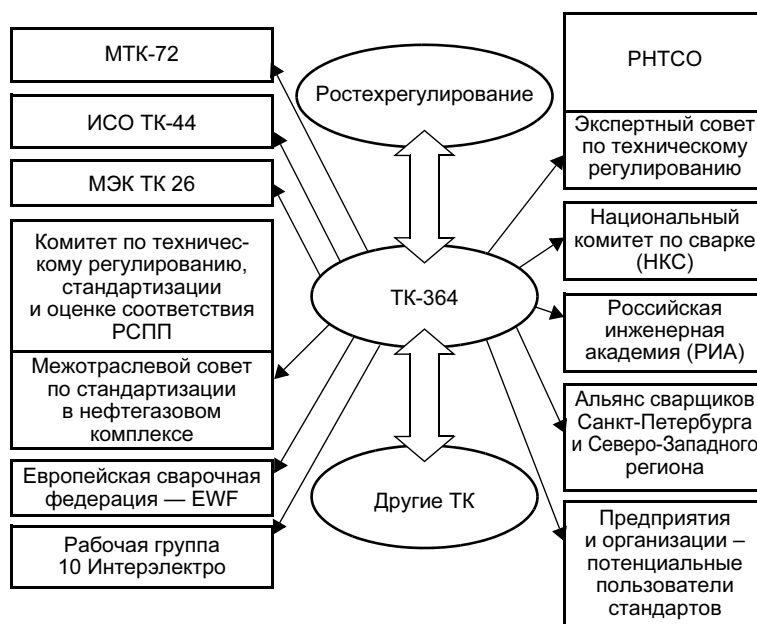
— принятия действующих межгосударственных стандартов и национальных стандартов Республики Беларусь в качестве национальных стандартов РФ (30—40 ед.);

— разработки стандартов организаций (в том числе РНТСО и Союза разработчиков и производителей сварочной продукции и других предприятий и организаций-членов ТК-364), гармонизированных с европейскими и международными аналогами, как основы будущих проектов национальных стандартов (20—30 ед.).

При таком подходе можно за три—четыре года полностью модернизировать существующую нормативную базу и сформировать к моменту вступления в действие названных СТР взаимосвязанные с ними перечни стандартов.

В настоящее время в ТК подготовлены перечни межгосударственных, международных и европейских стандартов, на основе которых необходимо разработать (подготовить, принять) первоочередные национальные стандарты, а также переведены 30 и технически отредактированы 20 зарубежных стандартов из этих перечней.

Часть из запланированных к разработке стандартов была предложена ТК-364 в проекты программ национальной стандартизации (ПНС) на 2004, 2005 и 2006 г. Однако профинансированы были только две темы из ПНС на 2006 г., которые выполняются в настоящее время.



Структура взаимодействия ТК-364 с родственными организациями по стандартизации в области сварки и родственных процессов

Эта разработка двух частей проектов национальных системообразующих стандартов на основе ИСО 3834 (1-2):2005 — «Требования к качеству сварки плавлением металлических материалов». Разработку третьей и четвертой частей этого стандарта Институт сварки России финансирует из собственных средств.

В этих стандартах установлены требования к элементам сварочного производства и управлению качеством сварочной деятельности. Для выполнения требований названных основных стандартов используются около 40 ссылочных стандартов ИСО на следующие группы объектов: сварочный персонал, технологию сварки, персонал неразрушающего контроля, термическую обработку, контроль и испытания, сварочное и сопутствующее оборудование.

Более половины из этих ссылочных стандартов уже использованы в качестве аналогов при разработке в МТК-72 «Сварка и родственные процессы» межгосударственных стандартов, которые в свою очередь необходимо в ближайшее время принять в России как национальные.

Кроме того, еще один системообразующий национальный стандарт ГОСТ Р МЭК 60974-1:2004 «Источники питания для дуговой сварки. Требования безопасности», разработанный Институтом сварки России в рамках ТК-364, в 2006 г. уже введен в действие. Этот стандарт предназначен для перечня стандартов, взаимосвязанных с СТР «О безопасности низковольтного оборудования».

В развитие работ по обновлению нормативной базы, начатой в 2003 г. и ориентированной главным образом на подготовку стандартов, взаимосвязанных с разрабатываемыми СТР и гармонизированных с зарубежными аналогами, в проект Программы национальной стандартизации РФ на 2007 г. ТК-364 предложил разра-

СТРУКТУРА
Технического комитета по стандартизации «Сварка и родственные процессы» (ТК-364)

Наименование ТК (ПК)	Организация	Соответствующие технические комитеты (подкомитеты) ИСО, МЭК	Специализация ТК (ПК) по виду продукции, код ОКП, область деятельности
ТК «Сварка и родственные процессы»	ОАО «Институт сварки России»	ИСО ТК 44 «Сварка и родственные процессы» МЭК ТК 26 «Электросварка»	
ПК 1 «Материалы для сварки и наплавки»	ОАО «НПО ЦНИИТМАШ»	ИСО ТК 44/ПК 3 (Сварочные материалы)	Проволока сварочная 12 1116, проволока стальная нержавеющая сварочная 12 2260, проволока сварочная легированная 12 2700, материалы для сварки и наплавки 127000, электроды металлические для дуговой сварки и наплавки (кроме нержавеющих) 127200, электроды сварочные нержавеющие 127300, проволока порошковая сварочная 127400
ПК 2 «Электросварочное оборудование»	ОАО «Институт сварки России»	ИСО ТК 44/ПК 6 (Контактная сварка) МЭК ТК 26/РГ 1 (Дуговое сварочное оборудование), РГ 6 (Оборудование контактной сварки)	Электросварочное оборудование 344100
ПК 3 «Контроль и испытание сварных соединений»	ОАО «НПО ЦНИИТМАШ»	ИСО ТК 44/ПК 5 (Контроль и испытания в сварке) ИСО ТК 135 (Методы неразрушающего контроля)	Металлоконструкции сварные 41 0001 Металлоконструкции сварные для машиностроения и металлообработки (без металлоконструкций для строительства) 41 3000 (Контроль качества сварных соединений)
ПК 4 «Технология сварки и наплавки»	ОАО «НПО ЦНИИТМАШ»	ИСО ТК 44/ПК 10/РГ 5 (Требование и квалификация ТП сварки металлических материалов)	Металлоконструкции сварные 41 0001 Металлоконструкции сварные для машиностроения и металлообработки (без металлоконструкций для строительства) 41 3000 (Технология сварки и наплавки)
ПК 5 «Сварные металлоконструкции»	ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко — филиал ФГУП НИЦ «Строительство»	ИСО ТК 59 (Строительные конструкции)	Сварные металлоконструкции
ПК 6 «Газопламенная обработка»	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»	ИСО ТК 44/ПК 8 (Оборудование для газовой сварки, резки и родственных процессов)	Газопламенная обработка 364500
ПК 7 «Оборудование для специальных способов сварки»	ФГУП «НИКИМТ»	МЭК ТК 26 (Электросварка)	Оборудование для специальных способов сварки 386000 (кроме 386200)
ПК 8 «Механическое сварочное оборудование»	ОАО «ВНИИСТ»	МЭК ТК 26 (Электросварка)	Механическое сварочное оборудование 386200
ПК 9 «Охрана труда»	Негосударственное учреждение «НИИОТ Московского государственного социального университета»	ИСО ТК 44/ПК 9 (Охрана труда при сварке и родственных процессах)	Охрана труда ОКС 13.100, 25.160.10, 25.160.30

Наименование ТК (ПК)	Организация	Соответствующие технические комитеты (подкомитеты) ИСО, МЭК	Специализация ТК (ПК) по виду продукции, код ОКП, область деятельности
ПК 10 «Пайка»	ОАО «НИАТ»	ИСО ТК 44/ПК 12 ИСО ТК 44/РГ 3	Пайка 344851
ПК 11 «Высокочастотное и ультразвуковое оборудование и технологии»	ФГУП «ВНИИТВЧ»	МЭК ТК 26 (Электросварка)	Высокочастотное и ультразвуковое оборудование и технологии 344290, 344300, 344410
ПК 12 «Управление качеством при сварке и родственных процессах»	ОАО «Институт сварки России»	ИСО ТК 44/ПК 10/РГ 1 ИСО ТК 44/ПК 10/РГ 3	Управление качеством при сварке и родственных процессах ОКС 03.120, 25.160
ПК 13 «Информационные технологии в сварке»	Издательский центр «Технология машиностроения»	ИСО ТК 44/РГ 4	Информационные технологии
ПК 14 «Терминология»	Союз разработчиков и производителей сварочной продукции (СРПСП)	ИСО ТК 44/ПК 7	Терминология в сварке и родственных технологиях ОКС 25.160
ПК 15 «Квалификация сварочного персонала»	СРПСП	ИСО ТК 44/ПК 11 (Требования и квалификация сварочного персонала)	Требования и квалификация сварочного персонала ОКС 25.160.01
ПК 16 «Производство сварных конструкций»	СРПСП	ИСО ТК 11 (Котлы и сосуды давления) ИСО ТК 164 (Механические испытания металлов)	Металлоконструкции сварные 41 0001 Металлоконструкции сварные для машиностроения и металлообработки (без м/к для строительства) 41 3000

ботку 17 проектов таких стандартов и 6 проектов, не связанных с СТР.

Экспертиза проектов специальных технических регламентов

Специалистами ТК проанализированы следующие проекты СТР:

— «О безопасности магистрального трубопроводного транспорта, внутрипромысловых и местных распределительных трубопроводов»;

— «О безопасности подъемно-транспортного оборудования и процессов его эксплуатации»;

— «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением свыше 0,07 МПа или при температуре нагрева воды свыше 115 °С»;

— «О безопасности процессов металлургических производств»;

— «О безопасности машин и оборудования»;

— «О безопасности низковольтного электрооборудования».

На некоторые из них разработчикам направлены отзывы.

В процессе анализа проектов СТР на продукцию, безопасность которой обеспечивается процессами сварки, выявлено отсутствие у разработчиков единого подхо-

да к установлению общих требований к процессу сварки в части их состава и содержания. Требования к сварным соединениям и отдельным элементам сварочного производства в рассмотренных проектах или отсутствуют полностью, или даются не в полном объеме, или же представлены необоснованно завышенными. И это несмотря на особую роль сварочных процессов при изготовлении поднадзорной продукции и принадлежность процессов сварки по стандарту ИСО 9001 к так называемым «специальным» процессам, требующим перед применением их одобрения (квалификации). В частности, в проекте СТР «О безопасности магистральных, внутрипромысловых и местных распределительных трубопроводов» в статье 19 «Требования безопасности при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте» отсутствуют общие требования как к сварным соединениям, так и элементам технологического процесса сварки (аттестации сварщиков, специалистов неразрушающего контроля и технологических процессов сварки). Приведена только одна фраза, касающаяся сварных соединений: **«Все сварные соединения, выполненные в процессе строительства, должны быть проконтролированы лицом, осуществляющим строительство, методами неразрушающего контроля».**

В проекте СТР «О безопасности подъемно-транспортного оборудования и процессов его эксплуатации» в

ст. 3 «Требования по обеспечению безопасности при проектировании ПТО» и ст. 4 «Требования безопасности ПТО при изготовлении» отсутствуют общие требования к сварным соединениям.

В ст. 4 приведены завышенные требования к элементам технологических процессов сварки: **«Применяемые при изготовлении ПТО сварочные материалы,... и оборудование должны быть аттестованы в установленном порядке».**

В проекте СТР «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением свыше 0,07 МПа или при температуре нагрева воды свыше 115 °С» в ст. 5 «Требования к оборудованию, работающему под давлением, учитываемые при проектировании и конструировании» и в ст. 6 «Требования к оборудованию, работающему под давлением, учитываемые при изготовлении» общие требования к сварным соединениям и к элементам технологических процессов сварки установлены не в полном объеме — отсутствуют требования к квалификации технологических процессов сварки.

В ст. 17 «Государственный надзор за соблюдением требований... технического регламента» установлены завышенные требования к изготовителю продукции по обязательной аттестации сварочных материалов и сварочного оборудования: **«...наличие аттестации применяемых для изготовления оборудования, работающего под давлением, сварочных материалов, технологий и оборудования».**

В проекте СТР «О безопасности процессов металлургических производств» общие требования к сварным соединениям и элементам технологических процессов сварки не приводятся вообще, несмотря на то, что упоминание термина «сварные соединения» в тексте проекта имеет место.

Таким образом, в первых четырех рассмотренных СТР общие требования к сварным соединениям и элементам технологических процессов сварки установлены для этапов проектирования и изготовления без учета потенциальных рисков возможного разрушения сварных конструкций, что противоречит закону РФ «О техническом регулировании». И по этой причине названные документы в неизменном виде не могут быть приняты, так как в итоге они не гарантируют обеспечение безопасности сварных конструкций, входящих в состав конечной продукции.

Для унификации подходов к установлению в СТР общих требований к процессам сварки разработчиками разных ведомств ТК-364 планирует в IV кв. 2006 г. подготовить методическое руководство по формированию СТР

на продукцию, безопасность которой определяется процессами сварки. Кроме того, ТК предполагает разработать методические рекомендации по выполнению изготовителями конечной продукции общих требований СТР с использованием стандартов, взаимосвязанных с техническими регламентами.

Заключение

Для решения обозначенных задач по реализации закона РФ «О техническом регулировании», а также для выполнения планов по межгосударственной и участия в международной стандартизации руководство ТК-364 в 2005—2006 гг. осуществило ряд организационных мероприятий, направленных на повышение результативности и эффективности деятельности ТК, таких как:

- дополнительное привлечение к работе в ТК еще 15 ведущих российских организаций и предприятий, специализирующихся в области сварки, таких как Союз разработчиков и производителей сварочной продукции, РНТСО (Российское научно-техническое сварочное общество), ФГУП ПО «Уралвагонзавод», ЗАО «Трансмашхолдинг», ОАО «ГИПРОНИИАВИАПРОМ», ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», Некоммерческое партнерство «Российское теплоснабжение», ОАО «Завод Электрик», ФГУП «ЦНИИТС», ГУП «ЦНИИ материалов», ИТЦ «Прометей» (г. Чехов), ООО «Энергодиагностика» и др.;
- изменение структуры ТК-364 и сближение ее со структурой ИСО ТК 44 «Сварка и родственные процессы» (см. таблицу);
- перезакрепление ТК к отделу машиностроения Ростехрегулирования;
- организация совместно с РНТСО экспертного совета по техническому регулированию при ТК;
- согласование с РНТСО предложений от ТК-364 к ежегодным программам национальной стандартизации;
- финансирование разработки ряда стандартов за счет Государственной программы НИОТР, НИОКР по развитию сварочного производства и смежных технологий на 2006—2010 гг. и средств разработчиков;
- активизация взаимодействия с другими родственными организациями по стандартизации, такими как МТК-72, ИСО ТК 44, МЭК ТК 26; комиссия по стандартизации РНТСО, Комитет по техническому регулированию, стандартизации и оценке соответствия РСПП, в том числе Межотраслевой совет по стандартизации в нефтегазовом комплексе и ряд других (см. рисунок).

С. В. ПРОТАСОВА, аспирант, Г. Д. ВОЛКОВА, д-р техн. наук
МГТУ "СТАНКИН"

Анализ и концептуальное моделирование взаимосвязей проектных и управленческих функций в деятельности проектно-конструкторской организации

В настоящее время обострение конкурентной борьбы в стремительно меняющихся рыночных условиях побуждает производителей машиностроительной продукции искать пути повышения эффективности производства. Поскольку многие показатели продукции закладываются на ранних этапах ее создания, то в процессе разработки машиностроительных объектов возникает необходимость повышения эффективности именно проектной деятельности. В настоящее время остро встает вопрос сохранения, передачи и развития накопленных интеллектуальных ресурсов проектных организаций. В связи с этим необходимо разрабатывать модели, обеспечивающие перенос знаний и опыта специалистов в вычислительную среду в виде корпоративных автоматизированных интеллектуальных и информационных систем. Вместе с тем практика внедрения информационных технологий выявила факторы, снижающие эффект их применения:

— часть опыта и практических знаний специалистов остается не выявленной, образуя источник недокументированных соглашений и умолчаний, не отраженных в проектном решении;

— проектно-конструкторская деятельность характеризуется прогнозным характером получаемых решений, базирующихся на знаниях о жизненном цикле машиностроительных объектов, что обуславливает применение ИПИ-технологий как мощного инструмента трансляции проектной информации на последующие стадии создания, эксплуатации и развития создаваемого изделия в едином информационном пространстве.

Одним из подходов к решению этих проблем является методология автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), в которой существенная роль отводится первоначальному формированию концептуального (семантического) модельного представления системы знаний проектной деятельности для эффективной организации вычислительной среды создаваемых автоматизированных систем. В соответствии с данной методологией концептуальная модель содержит две взаимосвязанные составляющие:

— динамическую или функциональную, представляющую описание алгоритма, системы действий по решению предметной задачи и называемую системой предметных зависимостей, которая отражает многоуровневую декомпозицию проектных действий;

— статическую или понятийную в виде структуры понятий на различных уровнях сложности, используемых специалистами предметной области при решении предметной задачи; статическая составляющая концептуальной модели носит название концептуальной структуры.

В качестве исходной предметной области для исследования и представления системы знаний выделена деятельность проектно-конструкторской организации в станкостроении. В отечественной практике проектирования сложилась система регламентации проектно-конструкторской деятельности на различных организационных уровнях — от государственного до уровня предприятия, обеспечивающая единый подход к разработке изделий и учитывающая специфику проектной деятельности в конкретной организации. Инициация любого проектного действия в области станкостроения определяется наличием заказа на его выполнение, называемого заявкой заказчика. Последняя — это документ, включающий описание набора требований к перспективному функционированию, эксплуатации и изготовлению создаваемого изделия или его частей в явном и неявном виде, которое уточняется и дополняется на каждой стадии проектирования. В рамках проектной организации в области станкостроения выполняется проектирование целого класса взаимосвязанных объектов: автоматических линий (АЛ), систем автоматических линий (САЛ), агрегатных станков (АС) и специальных станков (СС), предназначенных в основном для обработки деталей массового и крупносерийного производства, их составных частей от узлов до деталей, а также переналаживаемых автоматических линий (ПАЛ) для обработки группы деталей. Данное оборудование относится к классу специального технологического оборудования (СТО) и создается в рамках единичного производства, поэтому повышение эффективности процесса его проектирования определяется в большей степени использованием типовых узлов и их конструкций.

В процессе проектирования на основе постоянной информации порождается переменная (проектная) об изделии. К постоянной информации относятся архив проектов, фонд методических и руководящих материалов проектной организации, нормативные документы вышестоящего уровня (ГОСТы, ОСТы и т. д.), фонд научно-технической литературы. Процесс проектирования любых объектов станкостроения регламентирован необходимостью выполнения определенного набора стадий. При этом, как правило, в проектно-конструкторской организации унификация узлов и конструкций позволяет сократить сроки проектирования и объемы проектной документации за счет агрегирования стадий в этапы. В отличие от стадии этап всегда заканчивается формированием проектной документации с последующим ее согласованием с заказчиком и утверждением. Помимо этого каждая из стадий проектирования характеризуется выполнением ряда проектных процедур, которые в рамках проектно-конструкторской организации могут быть

детализированы в виде определенных проектных операций. В условиях рыночных отношений могут существовать ограничения на продолжение процесса проектирования в виде дефицита ресурсов проектно-конструкторской организации — финансовых, технологических, кадровых, временных. Среда процесса проектирования объектов станкостроения включает единую информационную среду и единый коллектив исполнителей (организационную структуру проектной организации). Информационная среда представляет как накопленную и зафиксированную в документальных источниках информацию, используемую в процессе проектирования объектов станкостроения (информационные фонды), так и необъективированный опыт и знания специалистов, работающих в данной области. Индивидуальная ответственность сотрудников и руководителей подразделений проектной организации при формировании проектных документов фиксируется в виде подписи. Внешние взаимосвязи проектной организации проявляются в рамках жизненного цикла изделия станкостроения, а также его составных частей и имеют различные аспекты: информационный, технический, производственный, экономический и др. Внутри проектной организации процесс проектирования взаимосвязан с процессами управления, поддержания и развития деятельности проектно-конструкторской организации.

Применение МАИТ к моделированию деятельности проектно-конструкторской организации в станкостроении позволяет представить систему знаний предметной области и специфику проектной деятельности в виде совокупности двух взаимосвязанных концептуальных моделей: процесса проектирования и процесса управления деятельностью проектно-конструкторской организации. Поскольку проектировщик на основании имеющейся информации и определенного объема знаний формирует конструкцию и свойства разрабатываемого изделия с учетом его перспективного функционирования, то основными из рассматриваемых процессов в рамках жизненного цикла являются процессы проектирования и функционирования будущего изделия. Другие этапы жизненного цикла изделия порождают различные условия и ограничения на собственно процесс проектирования. Процесс функционирования объекта станкостроения заключается в обработке исходной заготовки до получения требуемых детали, что является технологическим процессом.

Система предметных зависимостей процесса проектирования представляет декомпозицию задачи проектирования класса объектов станкостроения (АЛ, ПАЛ, АС) на проектные действия различных уровней сложности: от задачи полного процесса проектирования по этапам и стадиям до задачи проектной процедуры и проектной операции в виде алгоритма с использованием типовых алгоритмических конструкций (цикла, последовательности, переключателя). Формирование проектных решений может быть отражено в виде итерационного процесса получения множества версий информационного состояния изделия, что отражает необходимость согласования и утверждения проектных решений. Информационное состояние объекта проектирования рассматривается как совокупность состояния самого проектного решения по изделию, обусловленное завершением проектных работ в рамках определенной стадии проектирования, проектной процедуры или проектной операции, и состояния

разрабатываемой на него документации с учетом ее статуса. Каждая стадия характеризуется получением проектного решения, а завершающие этапы стадии — получением проектной документации по объекту и его составным частям. Итерационный процесс по информационным состояниям обусловлен необходимостью анализа имеющихся ресурсов для продолжения проектирования, что определяется в процессе управления проектной деятельностью. При формировании множества элементов статической составляющей концептуальной модели процесса проектирования центральным становится разложение понятия "процесс функционирования" в рамках жизненного цикла изделия. В концептуальной структуре используются предметные понятия или категории, отражающие содержание проектной деятельности на различных уровнях сложности: производственных циклов, процессов и задач, их компонентов, предметных объектов, их признаков и значений. Декомпозиция производственных процессов жизненного цикла на производственные задачи выполняется с учетом сложившейся (зафиксированной в нормативных документах разного уровня) структурой задач в данной предметной области и данной проектно-конструкторской организации. Анализ сложного понятия — процесса функционирования — позволяет выделить совокупность задач функционирования машиностроительного объекта и их компоненты, играющие определенную роль: условие, процесс, цель, средство. Свойства объектов, используемых в проектной деятельности, являются простейшими категориями в концептуальной структуре и называются признаками. Кроме того, введена группа интегральных признаков, отражающих информационное состояние изделия. Предметные категории различных уровней сложности организованы в иерархическую понятийную структуру, берущую начало от жизненного цикла проектируемого объекта как самой сложной предметной категории, что позволяет единообразно описать любой процесс жизненного цикла изделия.

Специфика концептуальной модели процесса управления деятельностью проектно-конструкторской организации заключается в следующем.

Система предметных зависимостей представляет комплекс предметных задач и отражает управленческий цикл. Декомпозиция комплекса предметных задач осуществляется с использованием типовых алгоритмических конструкций и с учетом основных управленческих функций, которые могут быть рассмотрены как отдельные комплексы предметных задач (планирование, контроль, учет, анализ).

Концептуальная структура представляет иерархию предметных категорий, в которой максимально сложной является предметная категория класса "процесс" — процесс проектирования. Разложение этой категории на категории класса "задач" позволяет представить сложные ситуации, относящиеся к проектным действиям разного уровня сложности: задача-проект, задача—этап, задача—стадия, задача—проектная процедура и задача—проектная операция. Любая сложная ситуация характеризуется набором одинаковых компонентов: условие, процесс, цель, средство, субъект. Но отдельная ситуация будет уточняться определенной совокупностью объектов, связанных с этими компонентами. Так, компонент "субъект" может быть представлен набором организационных элементов разного уровня сложности: проект-

но-конструкторская организация, служба, отдел, сектор, сотрудник. Каждому из этих объектов приписаны свойства, имеющие значение для управленческой деятельности: код, наименование, должность и статусные права субъекта при принятии проектных решений. В компоненте "процесс" свойствами проектных действий, значимыми с точки зрения управленческого цикла, могут быть плановые и фактические времена начала и окончания событий, их рассогласование по времени, а также различные временные оценки продолжительности проектного действия (максимальные и минимальные значения, усредненные и накопленные показатели). Компоненты "условие" и "цель" отражают входное и выходное для управленческого цикла информационные состояния объекта проектирования. В концептуальной структуре введен также объект "ресурс", относящийся к компоненту "средство" и описывающий такие характеристики технологических и финансовых ресурсов проектно-конструкторской организации, как плановый и фактический объемы, количество ресурсов, необходимое для начала проектного действия, количественные оценки по видам ресурсов и т. д.

Увязка динамической и статической частей концептуальной модели процесса проектирования, а также процесса управления деятельностью проектно-конструкторской организации графически отражена в соответствующих матричных диаграммах. В матричной диаграмме концептуальной модели процесса проектирования признаки, присущие объекту проектирования и зафиксированные в концептуальной структуре, становятся информационным содержанием системы предметных зависимостей. При этом обозначения строк матричной диаграммы представлены кодами предметных зависимостей, упорядоченными по определенным правилам, а столбцами матричной диаграммы являются предметные категории класса "признак". На пересечении строк и столбцов матричной диаграммы фиксируется участие того или иного признака в выполнении определенной предметной зависимости в виде функционального отношения с указанием роли используемых входных и выходных параметров-признаков — аргументов и функций. Такое представление информации проектной задачи позволяет анализировать по матричной диаграмме входную информацию для проектной задачи в целом, а также промежуточные и законченные проектные решения, которые будут являться функциями предметных зависимостей. Матричная диаграмма концептуальной модели процесса управле-

ния деятельности проектно-конструкторской организации сформирована по аналогичным правилам. Но строки данной матричной диаграммы содержат коды предметных зависимостей концептуальной модели процесса управления, а в столбцах матричной диаграммы зафиксированы простейшие категории-признаки из соответствующей концептуальной структуры. В матричной диаграмме концептуальной модели процесса управления отражены следующие особенности управленческой деятельности:

— получение временных характеристик при выполнении таких управленческих функций, как планирование и контроль, а также нахождение в ходе учета и анализа интегральных временных оценок, относящихся к проектно-действию более высокого уровня сложности;

— наличие у субъекта статусных прав на осуществление проектного действия, а также разработку, согласование и утверждение проектной документации на изделие с возможностью делегирования статусных прав в соответствии с определенным регламентом; изменение статуса проектной документации на изделие (на стадии разработки, согласования, утверждения) и изменение информационного состояния всего изделия;

— обеспеченность технологическими и финансовыми ресурсами на момент начала определенного проектного действия; получение их параметров на этапе планирования и по окончании проектного действия; нахождение различных количественных оценок объема ресурсов.

ВЫВОДЫ

Анализ проектной деятельности конструкторской организации в станкостроении показал, что возникает необходимость семантического моделирования для описания проектной деятельности в целом как сложного процесса в рамках жизненного цикла изделия.

2. С помощью методологии автоматизации интеллектуального труда проектная деятельность представляется в виде совокупности взаимосвязанных концептуальных моделей, описывающих процесс проектирования не только как отдельную фазу жизненного цикла создаваемого изделия, но и его взаимосвязи с другими видами деятельности в рамках жизненного цикла изделия, а также с процессами управления деятельностью проектно-конструкторской организации.

Л. С. ОРСИК, д-р экон. наук, А. А. ФЕДОРОВ, аспирант
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

Оценка эффективности и ранжирование инвестиционных проектов

При сопоставлении производственных издержек и капиталовложений по выставленным на конкурс проектам возможны пять случаев:

— реализация одного или нескольких проектов приведет к более высокому, чем у остальных, издержкам производства и потребует больших капиталовложений. Такие варианты заведомо неэффективны;

— проект, обеспечивающий самые низкие издержки, требует вместе с тем меньших по сравнению с остальными капиталовложений. Такой проект самый эффективный. Он должен быть принят к внедрению;

— несколько проектов обеспечивают одинаковые эксплуатационные затраты, но требуют различных капиталовложений. В этом случае наиболее эффектив-

ным является проект с наименьшими капиталовложениями;

— несколько проектов требуют одинаковых капиталовложений, но сопровождаются различными по величине издержками производства. Наиболее эффективным является проект с наименьшими издержками;

— проекты, обеспечивающие низкие издержки производства, требуют вместе с тем более высоких по сравнению с другими проектами капиталовложений. В этом случае при сравнении абсолютных величин издержек и капиталовложений по каждому проекту нельзя определить наиболее эффективный из них. Здесь необходимо установить, насколько целесообразны повышенные капиталовложения в проект с наименьшими издержками.

Таким образом, главный обобщающий показатель эффективности должен давать возможность соизмерить, привести к сопоставимому виду текущие производственные издержки (полученную прибыль) и капиталовложения. Этому требованию отвечает срок окупаемости дополнительных капиталовложений с учетом его трактовки в дореформенных методиках. Если сравнивают две альтернативы, например покупку одного из двух станков и в качестве показателя отдачи от капиталовложений используют экономию издержек эксплуатации и полученную прибыль, то срок окупаемости t_p рассчитывают по формулам

$$t_{\text{ри}} = \frac{K_2 - K_1}{I_1 - I_2}; \quad (1)$$

$$t_{\text{рп}} = \frac{K_2 - K_1}{\Pi_2 - \Pi_1}, \quad (2)$$

где K_1, K_2 — капиталовложения по сравниваемым вариантам, в данном случае цена машин ($K_2 > K_1$); I_1, I_2 — годовые производственные издержки по сравниваемым вариантам, в данном случае годовые эксплуатационные затраты ($I_2 < I_1$); Π_1, Π_2 — полученная за год прибыль по сравниваемым вариантам ($\Pi_2 > \Pi_1$).

Станок 2 будет эффективнее станка 1, если расчетный срок окупаемости будет не больше некоторого нормативного срока t_n .

Величина, обратная сроку окупаемости, обозначается в дореформенной терминологии как коэффициент эффективности капиталовложений

$$E = \frac{1}{t}. \quad (3)$$

Применительно к рассматриваемому примеру коэффициент эффективности дополнительных капиталовложений

$$E_{\text{ри}} = \frac{I_1 - I_2}{K_2 - K_1} \quad (4)$$

или

$$E_{\text{рп}} = \frac{\Pi_2 - \Pi_1}{K_2 - K_1}. \quad (5)$$

Видно, что экономическое содержание этого показателя, рассчитанное по формуле (3), можно трактовать как экономию годовых эксплуатационных затрат в расчете на 1 р. дополнительных капиталовложений, которая будет получена, если вместо более дешевого станка 1 ку-

пить более дорогой станок 2. Если же в числителе будут не годовые издержки производства, а годовая прибыль, то коэффициент эффективности капиталовложений будет представлять не внутрисистемный, а коммерческий эффект от покупки более дорогого станка в расчете на 1 р. Иными словами, коэффициент эффективности капиталовложений выражает в той или иной форме отдачу от каждого рубля капитальных вложений.

Исходя из этого может быть установлена нормативная величина коэффициента E_n . Экономически оправданной будет реализация тех вариантов, если выполнено условие

$$E_{\text{ри}}(E_{\text{рп}}) \geq E_n. \quad (6)$$

Чем больше положительная разница между расчетным и нормативным значениями, тем эффективнее будет реализация соответствующего варианта.

Для сокращения расчетов при сравнении большого количества альтернативных решений, например, приобретения технологически взаимозаменяемых станков, но по разным ценам и с разными эксплуатационными затратами, в качестве показателя внутрисистемной экономической эффективности целесообразно использовать приведенные затраты, а коммерческой эффективности — приведенную прибыль.

Приведенные затраты рекомендованы и их широко использовали для оценки экономической эффективности техники в дореформенный период. Они представляют сумму годовых эксплуатационных затрат и приведенных к одному году капиталовложений:

$$R_{\text{и}} = I_{\text{г}} + E_n K, \text{ руб/год}; \quad (7)$$

или

$$R_{\text{и}} = SQ + E_n K, \text{ руб/год}. \quad (8)$$

Приведенная прибыль представляет разницу между полученной за год прибылью и приведенных к одному году капиталовложений:

$$R_{\text{п}} = \Pi_{\text{г}} - E_n K, \text{ руб/год}; \quad (9)$$

или

$$R_{\text{п}} = \Pi Q - E_n K, \text{ руб/год}. \quad (10)$$

В уравнениях (7)–(10) $I_{\text{г}}$ — годовые производственные издержки; E_n — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; K — капиталовложения; S — себестоимость единицы продукции; Q — объем продукции, произведенной за год; Π — цена единицы продукции.

Из нескольких сравниваемых самым эффективным будет вариант с минимальными приведенными затратами или с максимальной приведенной прибылью. Таким образом, нет оснований отказываться от использования приведенных затрат в традиционном их толковании в качестве показателя (критерия) экономической эффективности. В равной степени это относится и к предложенному новому показателю — приведенной прибыли. Если авторы современных методик оставляют в них срок окупаемости, то должны быть оставлены и приведенные затраты, поскольку этот показатель не что иное как трансформация срока окупаемости. Это подтверждает тот факт, что срок окупаемости и коэффициент эффективности капиталовложений связаны между собой обратной зависимостью [уравнение (4)] с учетом условия (6).

Подставим в неравенство (6) значение $E_{рн}$ из формулы (4) и $E_{рп}$ из (5), тогда

$$\frac{I_1 - I_2}{K_2 - K_1} \geq E_n;$$

$$\frac{\Pi_2 - \Pi_1}{K_2 - K_1} \geq E_n.$$

После преобразования получим

$$I_1 + E_n K_1 \geq I_2 + E_n K_2,$$

$$\Pi_2 - E_n K_2 \geq \Pi_1 - E_n K_1.$$

Видно, что обе части этих неравенств — приведенные затраты и приведенная прибыль по сравниваемым вариантам капиталовложений. Однако в некоторых последних изданиях, приведенные затраты и приведенная прибыль исключены из числа обобщающих показателей экономической эффективности [1].

Для оценки эффективности и ранжирования инвестиционных проектов по их значимости предлагается использовать шесть частных критериев:

- суммарную прибыль в год (абсолютную прибыль);
- прибыль в расчете на 1 р. капиталовложений) (относительную прибыль);
- вероятность сбыта всей произведенной продукции;
- вероятность полного использования проектных мощностей;
- время до ввода объекта в действие;
- число вновь созданных рабочих мест.

Первый критерий определяет массу прибыли, которая может быть направлена как на возмещение вложений инвесторов, так и на образование фондов накопления и потребления строящегося (реконструируемого) объекта.

Второй критерий (традиционный) по экономической содержанию — коэффициент эффективности капиталовложений, который характеризует отдачу в расчете на 1 р. вложенных средств.

Третий критерий определяет целесообразность реализации проекта вообще. Если вероятность сбыта продукции будет мала, то вкладывать средства в проект очень рискованно. Они могут не возвратиться.

Четвертый критерий определяет целесообразность реализации проекта в полном объеме. Если вероятность полного использования проектной мощности предприятия мала, то нет смысла вкладывать средства в невостребованные мощности. Инвестиции не будут приносить эффекта. Проектная мощность предприятия может быть не использована полностью, например из-за сбоев в работе заводов-смежников.

Пятый критерий определяет срок, после которого начнется отдача от вложенных в проект инвестиций. Чем меньше этот срок, тем скорее начнут возвращаться затраченные средства.

Шестой критерий характеризует социальную значимость проекта: возможность создания дополнительных рабочих мест будет способствовать решению проблемы занятости населения.

Для сравнительной количественной оценки эффективности проектов по каждому из частных критериев (насколько данный проект лучше или хуже проекта, выбранного в качестве базового) могут быть использованы следующие частные (единичные) показатели эффективности [2]:

— коэффициент абсолютной прибыли

$$K_{ап} = \Pi_{ai} / \Pi_{аб},$$

где Π_{ai} , $\Pi_{аб}$ — прибыль по i -му и базовому проектам, руб/г;
— коэффициент относительной прибыли

$$K_{оп} = \Pi_{oi} / \Pi_{об},$$

где Π_{oi} , $\Pi_{об}$ — прибыль в расчете на 1 р. капиталовложений по i -му и базовому проектам, (руб/г)/руб;
— коэффициент вероятности сбыта продукции

$$K_{сб} = P_{сбi} / P_{сбб},$$

где $P_{сбi}$, $P_{сбб}$ — вероятность сбыта продукции по i -му и базовому проектам, %;

— коэффициент вероятности использования проектной мощности

$$K_{м} = P_{mi} / P_{мб},$$

где P_{mi} , $P_{мб}$ — вероятность использования мощности i -го и базового проектов;

— коэффициент ввода объекта в действие

$$K_{вд} = T_{вдб} / T_{вди},$$

где $T_{вдб}$, $T_{вди}$ — число лет с текущего года до окончания реализации базового и i -го проектов;

— коэффициент дополнительных рабочих мест

$$K_{рм} = M_i / M_б,$$

где M_i , $M_б$ — дополнительные рабочие места по i -му и базовому проектам.

За базовый принимают проект, который обеспечит наибольший эффект по данному единичному показателю. Поэтому эффективность любого проекта из сравниваемых с базовым по данному показателю будет меньше или равна его эффективности, т. е. соблюдается условие $K_{1-6} \leq 1$.

Поэтому окончательную оценку и выбор проектов для включения в инвестиционную программу с учетом рейтинга каждого из них делают с помощью комплексного (интегрального) показателя эффективности $K_{и}$. Данный показатель, однозначно характеризующий эффективность данного проекта в сравнении с другими, рассчитывают как сумму единичных показателей с учетом значимости каждого из них:

$$K_{и} = \sum_{j=1}^6 K_j \alpha_j,$$

где K_j — значение j -го единичного показателя эффективности; α_j — коэффициент значимости j -го показателя.

Коэффициенты значимости единичных показателей инвестиционного рейтинга проектов определяют экспертным путем. Установленный таким образом рейтинг проектов является основой их отбора для включения в инвестиционную программу технического перевооружения предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильник В. В. Инвестиционный менеджмент: Учебное пособие для вузов. М.: Академический проект, 2002. 271 с.
2. Федоров А. А. Комплексный анализ экономической эффективности инвестиционных проектов // Организатор производства. 2004. № 2 (21). С. 69—70.

И. Л. ВОЛЧКЕВИЧ, канд. техн. наук
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Подготовка специалистов в области машиностроительного производства

Успешное развитие любого государства невозможно без промышленного производства, а развитие промышленности — без целенаправленной подготовки специалистов, обладающих особыми знаниями и умениями, от природы человеку не присущими. Каждый исторический период требует своих специалистов. Некоторые направления подготовки исчезают вместе со своими объектами или областями деятельности, другие возникают с появлением существенно новых технических средств или отраслей производства. Но есть задачи, которые останутся актуальными всегда.

В настоящее время одной из особенно острых вновь стала необходимость подготовки инженеро-специалистов в области проектирования, реконструкции и технического перевооружения производств. Экономика России прошла периоды коллапса и стагнации, во время и после которой происходит обновление, а затем и развитие производственной базы в самых различных областях промышленности. Более того, техника и технология развиваются настолько быстро, что задачи реконструкции и перевооружения присутствуют постоянно на любом действующем производстве, которое ставит своей целью достижение преимуществ в рамках добросовестной конкуренции.

Организация, обновление и развитие промышленных предприятий создают необходимость в специалистах по проектированию и реконструкции производств, которых в нашей стране до недавнего времени целенаправленно не готовили. В то время как в странах запада обучение подобных специалистов является одной из основных задач инженерного образования, в СССР долгие годы было принято искусственное разделение и даже противопоставление технологов и организаторов производства. Проектировщиков же, которые обязаны быть специалистами и в технологии, и в организации, не обучали совсем. Становление подобных специалистов в проектных институтах происходило в процессе работы, в результате чего выпускник вуза, чаще всего инженер-технолог, за двадцать лет "вырастал" до должности ГИП — главного инженера проекта.

В наши дни ситуация изменилась. Специальность "Проектирование технических и технологических комплексов", основная направленность которой — проектирование машиностроительных производств, была открыта в МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2002 г. теперь она присутствует в ряде других технических вузов. Опыт первых выпускников (2004 г.) показывает, что крупнейшие проектные институты доверяют им должности главных инженеров проекта уже через год работы.

При разработке учебных планов новой специальности, состава и содержания специальных дисциплин за основу был вынужденно взят опыт подготовки инженеров-технологов механосборочного производства. Но инженеры-технологи и инженеры-проектировщики должны обладать существенно разными знаниями и, более того, существенно разным образом мышления. Разумеется, такая проблема, как открытие подготовки по новой специальности, не могла быть решена моментально, наилучшим образом и без использования какого-либо базиса, но это не отменяет необходимости постоянного совершенствования.

Открытие специальности по проектированию машиностроительных производств произошло впервые в новейшей истории России, но не впервые в истории нашего государства. Авторитетная школа подготовки специалистов в области машиностроительного производства сложилась на рубеже XIX—XX вв. в ИМТУ — Императорском московском техническом училище (МГТУ им. Н. Э. Баумана). Становление научно-педагогической школы ИМТУ представляло достаточно долгий и многоэтапный процесс, на протяжении которого сложились основные черты и особенности, отличавшие школу ИМТУ и ее выпускников от других высших учебных заведений.

Это было именно становление, а не возникновение: долгий, многофакторный процесс, обусловленный как историческими предпосылками, так и деятельностью личностей, работавших в учебном заведении. Сама школа отличалась многосторонностью и постоянным стремлением к развитию. Зародившись в системе Императорского московского воспитательного дома, основанного еще в 1763 г., ИМТУ было наследником системы обучения, сложившейся в Ремесленном учебном заведении воспитательного дома. В 1868 г. состоялось преобразование Ремесленного заведения в Императорское техническое училище, получившее статус высшего учебного заведения, а уже в 1872 г. ИМТУ представило свою систему подготовки специалистов в качестве экспоната на Всемирной выставке в Вене. Экспозиция училища получила высокую награду; этот успех был повторен на других всемирных выставках в Филадельфии и Париже. С этих пор на протяжении многих десятилетий выпускники ИМТУ, сменившего в 1917 г. свое название с "Императорского" на "Высшее" (МВТУ), составляли инженерную элиту страны.

С самого основания училища особое внимание уделялось задачам машиностроения как в преподавании, так и научных исследованиях, особая роль кото-

рых в деятельности научно-педагогической школы всегда была характерна для учебного заведения. Одной из первых инженерных дисциплин, которые начали преподаваться в ИМТУ с 1869 г., был курс "Составление смет и проектов машин и заводов". В 1903 г. ИМТУ было официально признано лучшим в России по преподаванию машиностроения. Именно в это время сложилась знаменитая конструкторская школа ИМТУ, не имевшая достойных аналогов, а к 1917 г. каждый дипломный проект как механического, так и химического отделения училища обязан был содержать раздел, посвященный проектированию производства. Кроме того, готовились и дипломы, основное содержание которых составляли проекты промышленных предприятий. Структура и содержание этих проектов не представляются устаревшими даже в наши дни. Особый вклад в развитие школы внес профессор Николай Францевич Чарновский, впоследствии репрессированный и на долгие годы вычеркнутый из официальной истории МВТУ.

Ниже приведены примеры дипломных проектов, выполненных на механическом отделении ИМТУ в 1914 г.¹

"Специальный проект завода (с механической разработкой)". Производство и механическая часть: Чарновский, Бриткин, Поляков. Электротехническая часть: Угримов, Сушкин.

Задания из различных родов мастерских и заводов: чугунолитейных, сталелитейных, прокатных, деревообделочных, специализированных машиностроительных, котельно-мостовых, железнодорожных и т. п. с указанием размера и основных условий производства и всех местных условий. Разработка общего плана производства и устройства мастерской или завода с составлением необходимых вариантов предварительного проекта. Подбор ассортимента рабочих машин и аппаратов и их размещение. Полная расчетная и детальная конструктивная разработка некоторых важнейших рабочих машин и аппаратов. Выяснение передач и транспортирующих устройств. Определение мощности двигателей, выбор типов и единиц, подсчет основных размеров. Детальная разработка приводов, транспортирующих устройств, их установок и ограждений. Выяснение типов и размеров зданий завода. Разработка одного из зданий, покрытий и стропильных ферм по

¹ Обзор преподавания Императорского московского технического училища на 1914—1915 гг. М.: "Московское печатное производство В. Венгерова", 1914. 133 с.

типу нормальных проектов. Сопоставление разработанного проекта с существующими сходными заводами.

"Специальный проект завода (со строительной разработкой)". Производство: Чарновский, строительная часть: ад.-проф. Кузнецов, отопление и вентиляция — преп. Чаплин, электротехническая часть — Угримов, Сушкин.

Задания из различных родов мастерских и заводов: чугунолитейных, сталелитейных, прокатных, деревообделочных, специализированных машиностроительных, котельно-мостовых, железнодорожных и т. п. с указанием размера и основных условий производства и всех местных условий. Разработка общего плана производства с составлением необходимых вариантов предварительного проекта. Подбор ассортимента рабочих машин и аппаратов и их размещение. Выяснение передач и транспортирующих устройств. Определение мощности двигателей, выбор типов и единиц, подсчет основных размеров. Выбор типов зданий: одноэтажного, многоэтажного, пролетного и других и разработка плана согласно вышеуказанным условиям производства, фабричному законодательству, гигиене, выбранным конструкциям и материалам. Конструктивная разработка.

Разумеется, со времен ИМТУ предметная область деятельности специалистов, т. е. машиностроительное производство, существенно изменилась. Тем не менее основные черты и закономерности становления научно-педагогической школы ИМТУ в области машиностроения остаются актуальными в силу, во-первых, объективной необходимости подобных специалистов для современной экономической системы страны, и, во-вторых, инвариантности этих основных черт и закономерностей развития к предметной области и конкретным техническим и технологическим решениям, присущим каждому этапу ее развития.

Именно поэтому изучение исторического опыта, опыта становления научно-педагогической школы ИМТУ в области машиностроения должно оказаться полезным при подготовке специалистов. Безусловно, как и 100 лет назад, новая научно-педагогическая школа не возникнет в один момент. Но не стоит забывать, что между преобразованием ИМТУ в высшее учебное заведение и первой наградой на всемирной выставке прошло всего четыре года.

Содержание зарубежных журналов¹

Modern Machine Shop
(N 4, Vol. 78, 2005, США)

Токарно-револьверные центры с увеличенным количеством одновременно работающего инструмента, с. 13, ил. 2.

Описаны новые токарные центры Puma TT фирмы Daewoo. Отмечается наличие двух револьверных головок с 12-приводными станциями каждая, обеспечивающих одновременное резание несколькими инструментами в отличие от аналогичных станков с одной револьверной головкой. Указывается на одинаковые размеры главного и вспомогательного шпинделей с синхронной сменой деталей "на лету". Возможно выполнение сложных операций обработки одной или двух деталей одновременно, что ведет к сокращению циклов, повышению производительности и снижению стоимости. Приводится перечень дополнительных принадлежностей, включающих встроенный манипулятор деталей, транспортер их отвода и прутковый питатель для работы без оператора.

Новые режущие пластины для обработки серого и вязкого чугуна, с. 27.

Фирма Seco Carboly предлагает токарные многогранные режущие пластины Triple-Zero 1 M нового поколения двух типов, обеспечивающих прогнозируемые и надежные результаты при обработке серого и вязкого чугуна. Пластины TK1000 предназначены для высокоскоростной обработки и отличаются оптимальными износостойкостью и теплостойкостью, что эффективно при обработке закаленных и высоколегированных сталей. Пластины TK2000 с исключительно вязким покрытием предназначены для очень тяжелых условий резания.

Chaneski W. Экономичное делопроизводство — это выявление излишеств, с. 44, 46, ил. 1.

Представлена статья эксперта Центра производственных систем Технологического института Нью-Джерси о зависимости потерь на производстве предприятия от ошибок делопроизводства в офисе. Отмечается необходимость своевременной и качественной обработки и выдачи заказов в цехи, правильного документооборота между сотрудниками офиса, исключения потерь на связи с заказчиками и др.

Вертикальные токарные станки серии VTC фирмы Gidding & Lewis, с. 73, ил. 2.

Описываются вертикальные токарные станки серии VTC фирмы Gidding & Lewis. Указывается на различные исполнения станков с диаметром планшайбы от 1250 до 3500 мм. Отмечается широкая область применения станков, начиная от низкопрофильных обойм подшипников до тяжелых деталей сложной геометрии и большой высоты. Среди конструктивных особенностей выделяется стандартная ось X большого перемещения, прецизионное устройство выставления направляющих по линейке, жесткий гидростатический ползу и ряд дополнительных принадлежностей для повышения производительности, например таких, как приводной инструмент.

Brandon M. Устройства для вращения обрабатываемых деталей, с. 82—85, ил. 2.

Рассмотрены устройства, применяемые для вращения обрабатываемых деталей, например валов различных конструкций, диаметров и длин, при их обработке на токарных или шлифовальных станках. Подобное устройство включает три основных элемента: корпус с коническим хвостовиком и опорным фланцем для установки в шпинделе станка; центральный стержень с рабочим конусом, базирующимся в центровой отвертке обрабатываемого вала, и торцевые кулачки для передачи вращающего момента к обрабатываемой детали.

Schuetz G. Современные требования к точности измерений, с. 100, 102.

В промышленности требования к точности непрерывно повышаются. Соответственно возрастает роль измерительных средств, точность которых должна быть в 10 раз выше, чем заданные допуски. Факторами управления качеством продукции являются эталон, обрабатываемая деталь, измерительное средство, персонал и состояние окружающей среды. Изменения, которые ка-

саются любого из этих факторов, требуют пересмотра всего процесса контроля. Приводится сравнительная таблица, где сопоставляются поля допусков и требуемая повторяемость измерительного средства.

Шлифовальный станок с ЧПУ для обработки коленчатых валов, с. 166, ил. 1.

Поставляемый фирмой Junker Machinery Inc. (США) станок Juscrank 6000 пополнил гамму машин Juscrank. Длина закрепляемого вала до 1500 мм, длина шлифования 1400 мм, обрабатываемые диаметры до 280 мм. Указывается, что возможна обработка крупногабаритных коленчатых валов, например для грузовых автомобилей. Станок оснащается двумя независимыми бабками с нитридовыми кругами, что позволяет одновременно шлифовать с одного установка по две коренных или шатунных шейки вала.

Шлифовальные станки с ЧПУ, с. 167, 170, ил. 2.

Описывается трехкоординатный станок FGP-608LM с линейными двигателями, предназначенный для мелкосерийного производства. Станок развивает ускорение 2,5 g, осуществляет 720 реверсов за 1 мин при ходе 15,8 мм, его стол перемещается со скоростью 100 м/мин. Зона обработки составляет 152 × 203 мм. Повторяемость позиционирования по оси X равна 2,5 мкм, по осям Y и Z — 1 мкм. Частота вращения шпинделя от 2000 до 10 000 мин⁻¹. Также сообщается о станках Blohm Profimat MC, поставляемых фирмой United Grinding Technologies, Inc. (США), которые предназначены для контурного и глубинного шлифования. На них осуществляется многокоординатная обработка. Ширина станка 2000 мм, что делает его удобным для встраивания в технологические линии. Станки оснащаются магазинами и руками для автоматической смены кругов, которая производится за 8 с. В магазине размещаются 20 кругов, в том числе 10 для инструментов диаметром менее 190 мм и 6 для кругов диаметром до 280 мм.

Токарный станок, с. 175—177.

Описан токарный станок Tornado T8M фирмы Colchester Lathes. Отмечается чугунная станина на основании спаренной конфигурации, имеющей стальную оболочку, заполненную полиуретаном с усиленной арматурой при общей массе 4,5 т. Указывается, что такая конструкция улучшает демпфирующую способность на 25 % при хорошей термостабильности. Приведены основные характеристики станка: используемые патроны диаметром 254 или 210 мм, мощность привода 22 кВт, верхний предел частоты вращения главного шпинделя 5000 или 3500 мин⁻¹, инструментального шпинделя — 4000 мин⁻¹ от двигателя мощностью 3,7 кВт, создающего крутящий момент 9,55 Н·м, отверстие под пруток диаметром 66 мм, дискретность позиционирования шпинделя по оси С составляет 0,001°.

Многофункциональные фрезы, с. 183, ил. 1.

Фирма Mitsubishi Materials IJ 5. A. предлагает многофункциональные концевые и торцевые фрезы APX, с помощью которых можно выполнять сверление, прорезку пазов, обработку фасок и скосов. Специфические особенности новых фрез делают их эффективными при высокоскоростной обработке различных сталей и чугунов. Высокая точность размеров, уменьшение сил резания и выделяемой теплоты резания достигаются за счет жесткого корпуса и геометрии режущих пластин.

Контрольно-измерительное устройство для шлифовальных станков с ЧПУ, с. 187, ил. 1.

Фирма Balance Systems Corp. (США) выпускает модульное устройство VM 20, которое выполняет ряд функций, в том числе балансировку шлифовальных кругов, измерение касанием и другие контрольные работы. Добавление модулей расширяет функциональные возможности устройства. Указывается, что применение устройства позволяет более качественно шлифовать детали. Выполняемые работы программируются как с пульта, так и из внешней носителей с использованием программного обеспечения операционной среды Windows.

Комбинированный зубообрабатывающий станок с ЧПУ, с. 194, 195, ил. 1.

Фирма Gleason Corporation (США) выпускает станок P 90 G, предназначенный для шлифования и фрезерования зубчатых колес. Осуществляются предварительное зубофрезерование и зубошлифование методом обката. Средствами программного обеспечения реализуются различные способы шлифования, в том числе контурное. Применяются червячные шлифовальные круги при обкате. Все виды шлифования выполняются неправящимися кругами.

¹ Раздел подготовлен инж. Г. С. Потаповой (по вопросам получения материалов из зарубежных журналов обращаться по тел./факсу: (495) 611 21 37, e-mail: stankoinform@mail.ru).

Ленточно-отрезной станок с ЧПУ, с. 215, ил. 1.

Описывается автоматизированный компактный станок Zeus фирмы PAT Mooney Inc. (США) с наклоняемой пыльной рамой, имеющий CNC управление и предназначенный для обработки заготовок сечением до 230 × 305 мм. Система ЧПУ станка задает длины отрезков с высокой точностью, а измерения выполняются автоматически.

**Trametal
(Спец. выпуск, 2005–2006, Франция)**

Мировой рынок инструментов, 73 с.

Приведены анализ и в табличном виде сведения о режущих материалах, выпускаемых фирмами ведущих стран в 2005–2006 гг. и предназначенных для выполнения основных операций механической обработки. В качестве режущих материалов рассматривались твердые сплавы, керметы, поликристаллические алмазы с покрытиями и без них, керамика Al_2O_3 и Si_3N_4 и смешанная, в том числе с покрытиями, поликристаллические КНБ с покрытиями и без них, а в качестве обрабатываемых — различные виды сталей, сплавов, чугунов, цветных металлов, композиты, графит, пластики и т. д. Черновая и чистовая обработка этими материалами ведется всухую, с охлаждением, на сверхвысоких скоростях, с повышенными подачами. Приведены сайты, e-mail и телефоны 73 фирм, включенных в таблицы.

**Trametal
(N 93, 2005, Франция)**

Станок для шлифования коленчатых валов, с. 13, ил. 1.

Описывается станок Jusrank 6000 для шлифования крупных коленчатых валов для автомобилей, выпускаемый фирмой Junker. Шлифование маятниковым способом осуществляется шлифовальными кругами из КНБ в два перехода — черновой и чистовой. Шлифование шатунных шеек и опорных поверхностей вала производится одновременно. Станок характеризуется высокой точностью и надежностью процесса шлифования.

Станки фирмы Realmeca/Spinner, с. 26, ил. 1.

Фирма Realmeca проектирует и изготавливает прецизионные токарные и фрезерные станки, отвечающие требованиям высокой технологии. Эти станки применяют для изготовления деталей, используемых в микромеханике, в системах, работающих на гиперчастотах, в производстве литейных форм, штампов, для гравировки, изготовления деталей в авиакосмической и медицинской промышленности, производства протезов, оптики, часов, деталей электроники и т. д. Приведены сведения о технологических возможностях этих станков и основные технические характеристики.

Новые станки фирмы Kasto, с. 30, ил. 1.

Сообщается о некоторых станках фирмы, созданных ею в последнее время. Среди этих станков — вертикальная ленточная пила KastoVaricut для резки под углом с возможностью двухстороннего регулирования угла. На станке можно резать заготовки сечением до 600 × 460 мм под прямым углом, сечением 425 × 460 мм для резки под углом до 45° и 300 × 460 мм для резки под углом 60°. Скорость резания ленточным пыльным полотном может регулироваться бесступенчато в диапазоне 1–120 м/мин. Возможно гидравлическое регулирование подачи пыльного ленточного полотна при наклоне до 3° относительно плоскости реза, что устраняет образование заусенцев.

Новые станки фирмы Cincinnati, с. 31, ил. 2.

Описываемый станок Lamb CFV5, характеризующийся высокой рентабельностью, имеет основные конструктивные элементы из чугуна, что обеспечивает его высокую стабильность. Эта модель выполняется в трех вариантах для обеспечения высокоточной и высокоскоростной обработки крупных серий деталей. Возможен также вариант станка с пятью осями.

Станки фирмы Mazak, с. 32, ил. 1.

Сообщается, что японская фирма Mazak постоянно расширяет гамму своих станков, создавая станки повышенной жесткости и мощности. Описывается станок Integrex 300 III STM с фрезерным шпинделем мощностью 18,5 кВт и с частотой вращения до 12 000 мин⁻¹. Мощность на противоположном шпинделе равна 26 кВт, частота вращения — 4000 мин⁻¹. Револьверная головка имеет девять позиций, среди девяти инструментов четыре имеют привод мощностью 3,7 кВт с частотой вращения 4500 мин⁻¹.

**Maschinenmarkt
(N 49, 2005, Германия)**

Kuttkat В. Сверление глубоких отверстий, с. 34, ил. 3.

Описывается четырехшпиндельный обрабатывающий центр

TZ 12 KW с мощностью привода 14 кВт и частотой вращения шпинделей 18 000 мин⁻¹, предназначенный для обработки деталей по пяти осям и сверления глубоких отверстий диаметром от 1 мм. Глубина обрабатываемых отверстий может достигать 100D. За счет одновременной обработки четырех закрепленных на столе центра деталей стоимость обработки одной уменьшилась на 40 %. Скорость холостых перемещений достигает 75 м/мин. Время между обработками составляет 5,9 с, а время смены инструмента — 3,6 с.

Зажимное устройство, с. 51, ил. 1.

Фирма dk Präzisionstechnik und Maschinenbau предлагает зажимное устройство Microfix для закрепления обрабатываемых деталей диаметром от 0,3 до 3 мм. К достоинствам предлагаемого устройства относятся точная фиксация детали при незначительном, а главное, регулируемом усилии зажима. Предлагают устройства с тремя механическими системами, что обеспечивает силовое замыкание деталей типа тел вращения с различной длиной.

Обрабатывающие центры фирмы Arnz Flott GmbH, с. 53.

Фирма модернизировала выпускаемые в течение ряда лет и хорошо зарекомендовавшие себя на рынке обрабатывающие центры BC 30 Elite и BC 40 Super путем придания им нового дизайна и улучшения некоторых технических характеристик, например они оснащены шпинделями с частотой вращения до 15 000 мин⁻¹, скорость быстрых перемещений по осям X, Y и Z увеличена соответственно с 36, 36, 30 до 48, 48, 36 м/мин. Предусмотрено внутреннее охлаждение инструментов. Магазины рассчитаны на 20 инструментов.

(N 3, 2006, Германия)

Röder T. et al. Новое противокоррозионное средство, с. 30, 31, ил. 2.

Фирма Fuchs Europe Schmierstoffe (Германия) разработала защитное средство, не содержащее летучих органических соединений, которое помимо хороших антикоррозионных свойств обладает рядом преимуществ: возможностью нанесения на влажные металлические поверхности (без сушки), температурой воспламенения выше 90 °С, совместимостью со всеми металлами, деэмульгирующей способностью и др.

Kraus J. Увеличение выдержки в ванне при очистке деталей тормозной системы от масла, с. 32, ил. 2.

Приведены особенности очистки тормозного клапана автомобиля на заводе Gifhorn, изготавливаемого из алюминиевого сплава. Очистка производится в щелочной ванне в бескислотном деэмульгаторе HP 90 с применением трехступенчатого промывочного процесса и вакуумной сушки. Содержание масла уже после первой ступени очистки составляет около 1 %. Промывка очищенных деталей производится водой под давлением 70 МПа. Отмечается улучшение качества очистки при увеличении времени выдержки деталей в ванне.

Алмазоподобные покрытия, с. 46, ил. 1.

Фирма Metaplas Ionon Oberflächeveredelungstechnik (Германия) разработала технологию нанесения на детали многослойных защитных покрытий типа W—C H (mod) толщиной 2–4 мкм, которые отличаются низким коэффициентом трения, высокими твердостью и износостойкостью. Покрытия наносят физическим осаждением из паровой фазы при температуре 200 °С.

**Finer Point
(2005, спец. выпуск, США)**

Алмазы для инструментов для микро- и нанобработки, с. 11, 12.

Описывается новейший наноалмазный инструмент (ультрадиспергированная разновидность, содержащая около 100 000 триллионов элементарных частиц на один карат). Диаметр частиц обычно находится в пределах 2–10 нм, наиболее распространенный размерный диапазон 3–7 нм. Наноалмазы применяют в синтетических монокристаллических и поликристаллических, а также в термообработанных синтетических монокристаллических инструментах. Появились также кластерные алмазы.

Современные инструментальные материалы, с. 19, ил. 2.

Описываются современные инструментальные материалы фирмы ILJIN: IBON — поликристаллический нитрид бора с тонкозернистой и случайно ориентированной текстурой и IPOL — поликристаллические алмазы, отличающиеся сверхнаивысшей теплопроводностью и равномерным износом во всех направлениях. Материал IBON предназначен для обработки чугунов, закаленных сталей и жаростойких сплавов, а материал IPOL — для обработки цветных металлов и сплавов, карбидов вольфрама, пластиков, дерева.

Крупнейшие компании машиностроения и автомобилестроения – участники рейтингов "Эксперт-400" и "Капитализация-200"

В октябре 2006 г. в рамках 2-го ежегодного Форума крупного бизнеса России "Эксперт 400" состоялось традиционное представление XII рейтинга крупнейших российских компаний, составленного рейтинговым агентством "Эксперт РА".

В итоговую таблицу рейтинга 400 крупных российских компаний, участвовавших в нем, вошли 47 предприятий машиностроительного комплекса.

В качестве главного критерия при составлении рейтинга "Эксперт-400" был принят показатель, характеризующий объем реализации продукции (работ, услуг) в 2005 г. Для компаний, занятых в сфере промышленности, это объем выручки от продажи продукции. Итоговые таблицы рейтинга основаны на информации, представленной по запросу агентства "Эксперт РА" руководством этих компаний, подтвержденной российской бухгалтерской отчетностью или отчетностью по МСФО/ISGAAP.

Информация была дополнена данными управленческого учета Росстата, министерств и ведомств, корпоративных сайтов в Интернете, биржевых структур, а также данных, собранных аналитиками инвестиционных компаний и СМИ.

Положительную оценку методики дала авторитетная аудиторская компания ЗАО "ПрайсВотерхаус Купер Аудит" ("ПвК Аудит"). Следует отметить, что ЗАО "ПвК Аудит" проводило оценку методики еще в 1999—2001, 2004 и 2005 гг.

Сводные показатели предприятий машиностроения в отраслевой структуре рейтинга по объему реализации приведены в табл. 1.

По объему реализации продукции в 2005 г. отрасль машиностроения в структуре промышленности устойчиво занимает третье место, уступая лишь нефтяной и нефтегазовой отраслям (первое место) и черной металлургии (второе место).

В этом выпуске рейтинга объем реализованной продукции машиностроительных компаний увеличился лишь на 15,4 %

(в рейтинге 2005 г. — на 20,5 %, в 2003 г. — на 23,1 %). Если принять во внимание, что средний прирост цен производителей в 2005 г. составил 18,2 %, можно утверждать уже о реальном спаде в машиностроении. Перспективным представляется развитие в первую очередь машиностроительной базы ТЭКа для производства нефтяного и энергетического оборудования. Другим динамично растущим сегментом машиностроительного бизнеса должен стать ВПК и прежде всего производители и разработчики ракетных систем, во многом до сих пор базирующиеся на технологическом заделе советского периода.

Из 47 компаний машиностроительной отрасли, принявших участие в рейтинге "Эксперт400", 11 предприятий автомобилестроения (23,4 %). К сожалению, в рейтинге 2005 г. не участвовали такие компании, как ОАО "Заволжский моторный завод", ОАО "Павловский автобус", ОАО "УАЗ".

По объему реализации в 2005 г. первые четыре позиции заняли соответственно ОАО "АвтоВАЗ", группа ОАО "ГАЗ", группа "СОК", ОАО "КамАЗ" (табл. 2).

Сравнивая технико-экономические показатели автомобильных компаний в I полугодии 2006 г. по сравнению с уровнем I полугодия 2005 г., следует отметить улучшение показателей практически по всем ведущим предприятиям, участвующим в рейтинге.

В частности, к своему 40-летнему юбилею ОАО "АвтоВАЗ" в I полугодии 2006 г. изготовил 362 580 автомобилей, что на 8,2 % превысило уровень соответствующего периода 2005 г. АвтоВАЗ продолжает сохранять за собой более 66 % всего выпуска легковых автомобилей на территории России и занимает 17 место в рейтинге крупнейших мировых автомобилестроительных фирм по итогам 2005 г. (данные OICA) (рис. 1).

Успешным является прирост выпуска и в группе ОАО "ГАЗ", как в секторе малотоннажных автомобилей (на 15,4 % против

Таблица 1

Отрасль	Количество компаний в рейтинге "Эксперт-400"	Объем реализации в 2005 г.		Объем реализации в среднем на компанию (млн руб.)	Средний темп прироста, %
		млн руб.	млн долл.		
Промышленность	208	1 071 619,4	378 799,3	51 520,3	33,7
Всего, в том числе машиностроение	47	947 669,9	33 498,6	20 163,2	15,4

Примечание. По данным журнала "Эксперт" № 37, 9—15 октября 2006 г. (рейтинговое агентство "Эксперт РА").

Таблица 2

Место в рейтинге "Эксперт-400"	Компания	Объем реализации в 2005 г.		Темп прироста 2005/2004 гг., %	Место в рейтинге "Капитализация-200"
		млн руб.	млн долл.		
21	АвтоВАЗ	132 531,0	4684,7	5,2	44
298	АвтоВАЗагрегат	7845,9	277,3	8,9	—
231	Автофрамос	10 621,0	375,4	79,5	—
365	АМО "ЗИЛ"	6048,3	213,8	-14,4	—
27	Группа "ГАЗ"	87 839,4	3105,0	н. д.	66
184	Джи-Эм АвтоВАЗ	13 107,6	463,3	-2,6	—
42	КамАЗ	56 202,8	1986,7	18,4	63
86	Северсталь-Авто	26 541,0	938,2	15,3	89
39	Группа "СОК"	64 440,6	2277,9	10,5	—
344	"Урал", Автомобильный завод	6504,8	229,9	16,0	—
60	"Форд Мотор Компани"	39 202,9	1385,8	61,3	—

Примечание. По данным журнала "Эксперт" № 37, 9—15 октября 2006 г. (рейтинговое агентство "Эксперт РА").



Рис. 1. Экспозиция ОАО "АвтоВАЗ" на Автосалоне—2006



Рис. 2. Малотоннажный автомобиль ОАО "ГАЗ"

уровня 2005 г.), так и в секторе среднетоннажных автомобилей (на 12,9 %) и даже в производстве автомобилей "Волга" (на 2,4 %) (рис. 2).

ОАО "КамАЗ" увеличило выпуск грузовых автомобилей в I полугодии 2006 г. по сравнению с аналогичным периодом 2005 г. на 36,1 %.

Продолжается значительно более высокими темпами производство легковых автомобилей иностранных моделей, освоенных заводами, расположенными на территории России (кроме ЗАО "GM-АвтоВАЗ" — 20 %). В частности, активно осваивают созданные мощности ОАО "Автофрамос": в I полугодии выпуск составил 20 296 ед.; ЗАО "Форд Мотор Компани" выпущено 27 770 автомобилей, что в 2,08 раза больше, чем за I полугодие 2005 г.

Автомобилестроительные компании также участвовали в рейтинге "Капитализация-200".

Из 200 эмитентов, торгующих ценными бумагами на российских и/или иностранных биржах с выходом на IPO, автомобильные компании были представлены АвтоВАЗом, группой "ГАЗ", КамАЗом и ОАО "Северсталь-Авто" (см. табл. 2). Кроме того, в

Таблица 3

Место в рейтинге "Капитализация-200"	Автомобильная компания	Отношение капитализации к	
		реализации (P/S ratio)	чистой прибыли (P/E ratio)
66	Группа "ГАЗ"	0,30	8,56
44	АвтоВАЗ	0,35	33,34
126	Заволжский моторный завод	0,47	6,01
63	КамАЗ	0,48	3496,17
116	УАЗ	0,50	20,53
89	Северсталь-Авто	0,57	7,96

Примечание. По данным журнала "Эксперт" № 37, 2006 г. ("Эксперт РА").

этом рейтинге приняли также участие Заволжский моторный завод (126 место) и УАЗ (116), не участвовавшие в рейтинге "Эксперт-400" по итогам 2005 г. (табл. 3).

Следует отметить, что в список аутсайдеров фондового рынка попали практически все компании отечественного автомобилестроения.

Ведь среднее отношение рыночной стоимости компаний рейтинга "Капитализация-200" к объему их реализации (P/S ratio) в 2006 г. достигло 2,46 (в 2005 г. — 1,47), отношение капитализации к чистой прибыли (P/E ratio) составило 14,45 против 10,99 в 2005 г. Низкая ликвидность акций (категория С) и, как следствие, не слишком большой интерес портфельных инвесторов к этим компаниям понятен: рассчитывать на быстрый рост прибыли в них пока не приходится.

Однако инвесторы показателями P/E и P/S во многих случаях явно не руководствуются.

Е. С. Добринский, канд. техн. наук
("Центр экспертных программ")

5-й Международный форум "PCVEXPO—2006"

Со 2 по 5 октября 2006 г. в КВЦ "Сольники" проходил 5-й Международный форум PCVEXPO, объединивший пять специализированных выставок: "Насосы", "Компрессорная техника", "Пневматика и пневмоинструмент", "Арматура", "Приводы и двигатели".

Организаторы форума — Выставочный холдинг MVK, Российская ассоциация производителей насосов, Ассоциация компрессорщиков и пневматиков, Научно-промышленная ассоциация арматуростроителей.

Общая площадь экспозиции составила 19 тыс. м², в выставке участвовало более 450 экспонентов из 24 стран, в том числе и из России. В экспозиции были широко представлены промышленные насосы многих типов, насосные установки и агрегаты, компрессоры для всех отраслей промышленности, контрольно-измерительные приборы, пневматические системы, оборудование и инструмент, промышленная трубопроводная и строительная арматура, комплексные электроприводы, редукторы, муфты, тормоза, подшипники и др.

Ниже приведено краткое описание некоторых экспонатов и разработок, вызвавших наибольший интерес у специалистов.

Завод дозировочной техники "Ареопак" (Санкт-Петербург) демонстрировал дозировочные агрегаты серии НДР (рис. 1) с регулированием подачи изменением длины хода плунжера при работающем и остановленном агрегате. Такие агрегаты широко применяются в тепло- и электроэнергетике, нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслях промышленности, в технологических процессах, связанных с отмериванием и последующим смешиванием различных жидкостей. Они служат для объемного дозирования нейтральных и агрессивных жидкостей, эмульсий и суспензий с максимальной плотностью до 2000 кг/м³ и температурой от -15 до 200 °С, концентрацией твердой неабразивной фазы до 10 %. Диапазоны: номинальных подач дозировочных агрегатов — 0,4—15 200 л/ч; предельных дав-

лений — 0,4—40 МПа при мощности двигателя до 5,5 кВт. Конструкция редукторов позволяет осуществлять монтаж одноплунжерных агрегатов одностороннего и двустороннего действия. Применение дозировочных агрегатов определяется коррозионной стойкостью материалов деталей проточной части в перекачиваемой среде. Основные детали проточной части агрегатов выполнены из сталей 12Х18Н9Т, 20Х13, 10Х17Н13М2Т, 06ХН28МДТ, Н70МФВ или титанового сплава BT1-0.

ОАО "РУС ЭЛПРОМ" (Москва) — разработчик и изготовитель двигателей для привода механизмов с вентиляторной характеристикой мощностью до 1400 кВт, напряжением до 690 В — предложило потребителям свои разработки.

Трехфазный асинхронный взрывозащищенный высоковольтный электродвигатель с короткозамкнутым ротором типа 1BA0 — 560 LB-8Y2,5 для привода стационарных машин и механизмов, работающих во взрывоопасных зонах. Уровень взрывозащиты типа "взрывонепроницаемой оболочки". Номинальный режим работы — продолжительный. Двигатель предназначен для работы от сети переменного тока напряжением 6000 В и частотой 50 Гц. Мощность двигателя 630 кВт, синхронная частота вращения ротора 750 мин⁻¹, кпд равен 94,9, cos φ = 0,8.

Высоковольтные электродвигатели серии АЗМ (рис. 2) с номинальной мощностью до 8000 кВт, частотой вращения ротора 3000 мин⁻¹. Блочно-модульное исполнение обеспечивает компактность конструкции, удобство монтажа, обслуживания и ремонта. Подшипники скольжения фирмы RENK обеспечивают низкий уровень вибрации и допускают работу при прекращении подачи масла, возможность применения изолированных вкладышей. Эффективное охлаждение обеспечивает стойкость к критическим условиям по нагрузке, разгону и перегрузке.

НПП "Насосы и уплотнения" (Москва) демонстрировало собственные и зарубежные разработки.

Динамический ламинарный насос ОНЛ 80-80-250К-15/2 для неповреждающего перекачивания вязких (до 50 Па·с) продуктов, чувствительных и перемешиванию и измельчению, содержащих твердые и мягкие включения. Массовая доля твердых неабразивных включений до 80 %. Специально сконструированное рабочее колесо и отвод обеспечивают ламинарное течение перекачиваемых продуктов и малозумность при работе насоса. В отличие от винтовых, кулачковых и шестеренчатых в представленном насосе изнашивается только торцевое уплотнение вала (с частотой вращения 2900 мин⁻¹) и подшипники двигателя. Подача насоса (20—70 м³/ч) зависит от гидравлического сопротивления трубопровода, что упрощает его регулирование. Мощность электродвигателя насоса 15 кВт.

Шланговый дозировочный насос Smart 40 для перекачивания вязких, агрессивных и содержащих абразив жидкостей. Рекомендован для процессов дозирования и технологических процессов, где утечки недопустимы. Оснащен четырьмя рабочими трубками диаметром 9—16 мм, подача жидкости на одну трубку 0,6 м³/ч. Температура перекачиваемой жидкости до 100 °С, масса насоса 22 кг.

Торцевые уплотнения валов, разработанные в Великобритании. Утечка у таких уплотнений в 10—15 раз ниже, чем у отечественных (менее 0,2 см³/ч). Они имеют расширенный температурный диапазон применения (для воды до 150 °С, для нефтехимических продуктов до 500 °С). Такие уплотнения удобны при монтаже, они взаимозаменяемы с отечественными уплотнениями.

Уплотнения подшипников, также разработанные в Великобритании, обеспечивающие полное отсутствие утечки смазки и попадание в подшипник посторонних частиц.

Научно-исследовательский испытательный комплекс ОКБМ (Нижний Новгород) предложил различные насосы и запорную арматуру.

Центробежный погружной электронасос общего назначения ЦПН 100/25 для перекачивания сильнозагрязненных жидкостей, а также агрессивных и коррозионных сред. Насос полностью погружается в перекачиваемую жидкость на глубину до 20 м. Применяется во вспомогательных и стационарных системах АЭС для перекачивания стоков из водоприемных камер, в насосных станциях систем водоотведения промышленных и бытовых стоков, для перекачивания осадка на станциях очистки, откачивания воды при карьерных, строительных, ремонтных и других работах без строительства насосных станций и водозаборных устройств. Номинальные параметры: подача насоса — 100 м³/ч, напор — 25 м. Пропускная способность неабразивных взвешенных частиц не более 40 мм. Мощность электро-



Рис. 1. Дозировочный агрегат серии НДР



Рис. 2. Высоковольтный электродвигатель серии АЗМ

двигателя насоса 15 кВт, масса электронасоса 300 кг.

Герметичный лабиринтно-винтовой электронасос ГЭН 8/130 (рис. 3) для перекачивания взрывопожароопасных, токсичных, агрессивных жидкостей, сжиженных газов. Оснащен магнитной муфтой и электродвигателем взрывозащищенного исполнения. При работе исключаются утечки перекачиваемой жидкости, что обеспечивает безопасность и экологическую чистоту окружающей среды. Подшипники электронасоса изготовлены из силицированного графита, детали, контактирующие с перекачиваемой жидкостью — из коррозионно-стойкой стали. Номинальная подача электронасоса 8 м³/ч. Мощность электродвигателя 18,5 кВт. Плотность перекачиваемой среды 690 кг/м³. Срок службы (в зависимости от перекачиваемой жидкости) 8—20 лет. Масса 300 кг.

Обратный клапан для управления технологическим процессом и применения в качестве устройства, исключающего протечек в коммуникациях высокого давления. Клапан имеет высокую коррозионную

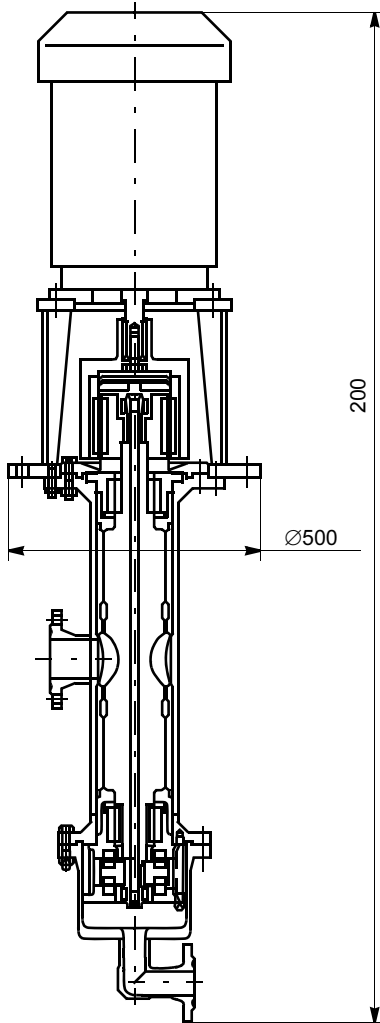


Рис. 3. Схема герметичного лабиринтно-винтового электронасоса ГЭН 8/130



Рис. 4. Автоматизированная система повышения давления

стойкость в условиях сильноагрессивных рабочих сред. Конструкция компактна и экологически безопасна, удобен при эксплуатации и ремонте.

ОАО "Ливгидромаш" (Ливны Орловской обл.) демонстрировало насосы и агрегаты различного назначения.

Автоматизированная система повышения давления (АСПДМ) (рис. 4) для промышленного водоснабжения, повышения давления и автоматического поддержания давления при изменяющемся суточном потреблении воды в системах водоснабжения. АСПДМ состоит из двух или пяти электронасосов, установленных на общем основании. Блок управления автоматически отключает или подключает необходимое число насосов в зависимости от интенсивности забора воды потребителями. Элементом обратной связи служит датчик давления, установленный на напорном коллекторе. Температуры: перекачиваемой жидкости — 0—70 °С, окружающей среды — 0—40 °С. Питающее напряжение 380 В.

Центробежный насос ЦН 90/100 для перекачивания топлив для реактивных двигателей в чистом виде или с противодокристаллизационными жидкостями (до 0,3 %) (автомобильных бензинов, авиационных бензинов и дизельных топлив) с кинематической вязкостью до $6 \cdot 10^{-5}$ м²/с, плотностью 755—860 кг/м³, температурой —40—50 °С, а также воды и других жидкостей, сходных с водой по вязкости и химической активности, и воды с примесями нефтепродуктов. Возможно применение во взрывоопасных производствах. Подача насоса 90 м³/ч, давление на входе 0,3 МПа, максимальная мощность двигателя 44 кВт.

Станция управления и защиты СУиЗ "Лоцман +45" для оснащения погружных электронасосов, а также любых исполнительных механизмов, в составе которых используются асинхронные электродвигатели мощностью 2—45 кВт. Станцию,

погружной электронасос и датчики уровня жидкости в резервуаре применяют для автоматического поддержания уровня воды в резервуаре или автоматического осушения дренажного приямка. Станция включает микроконтроллер, датчики по току, электромагнитный пускатель с электротепловым автоматическим выключателем. В качестве датчиков уровня использованы датчики и электроконтактный манометр. Станция осуществляет защиту погружных электронасосов от перегрузки по току, обрыва фаз, перекода фаз и "сухого" хода. Масса станции не более 10 кг.

ОАО "Эталон" (Ногинск Московской обл.) демонстрировало насосы различного назначения.

Объемный насосный агрегат НП-600 (рис. 5) для гидравлической опрессовки сосудов, котлов, различных емкостей и систем трубопроводов после выполнения монтажных работ, при условии обеспечения давления рабочей жидкости на входе либо как станция для перекачки. Давление рабочей жидкости: на выходе — 62 МПа, на входе — 1 МПа. Подача насосного агрегата $7 \cdot 10^{-5}$ м³/с, потребляемая мощность двигателя 7,5 кВт, питающее напряжение 380 В, габаритные размеры 1420 × 520 × 680 мм.



Рис. 5. Объемный насосный агрегат НП-600

Гидравлический трубогиб ТТР-50М с ручным гидроприводом и автоматическим обратным ходом штока для гибки стальных водогазопроводных труб диаметром 15, 20, 25, 32, 40 и 50 мм при наибольшем угле изгиба 90°. Ход штока трубогиба 250 мм. Трубы можно гнуть в холодном состоянии без предварительной набивки их песком. Используя специальные приспособления, трубогиб можно применять для гибки других профилей. Габаритные размеры 595 × 700 × 190 мм, масса 60 кг.

Гидравлический домкрат ДГО-200 для подъема технологического оборудования, металлоконструкций при производстве монтажных и демонтажных работ. Грузоподъемность домкрата 200 т, высота подъема до 160 мм, давление рабочей жидкости 41,2 МПа, усилие на приводной рукоятке 196 Н, рабочая жидкость — минеральное масло. Габаритные размеры 800 × 470 × 310 мм.

Группа компаний "ПАКТ" (Москва) предложила компрессорную установку VNI-11-14, разработанную в США. Установка мгновенно реагирует на необходимый объем сжатого воздуха, снижая или увеличивая производительность при под-

ключении или отключении производственного оборудования. Это позволяет экономить электроэнергию и оптимально обеспечить сжатым воздухом производственный процесс. В компрессорной установке отсутствует передаточный механизм с крутящим моментом от двигателя к винтовой паре (шестерни, муфты, ременная передача, устройство натяжения и т. п.). Ротор электродвигателя установлен на выходном валу винтовой пары, что повышает надежность компрессора, так как исключены наиболее изнашиваемые узлы и детали передачи. Интегрированная компоновка винтового блока маслосборника и электродвигателя позволяет добиться оптимальной работы всех узлов. Установка заправлена синтетическим охлаждающим маслом Ultra Coolant Plus, замену которого необходимо производить через 9000 машино-часов. Ее производительность на выходе до $1,13 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{мин}$, мощность привода 11 кВт, уровень шума при работе 68 дБ. Установка работает при температуре окружающей среды $2\text{--}40^\circ\text{C}$, питающее напряжение 380 В. Габаритные размеры $1315 \times 731 \times 835 \text{ мм}$, масса 307 кг.

Фирма также демонстрировала различный инструмент: ударные и угловые гайковерты, шлифовальные и полировальные машинки, гравировальный инструмент, зачистные молотки, пневмозубила, виброуплотнители, трамбовки, резьбонарезной инструмент и др.

Фирма "ТЕХНОТЕРРА" (Москва) предложила оборудование и технологии, разработанные за рубежом.

Трубогиб SB-10-3A-1S (2S) с электроприводом — станок, работающий в автоматическом режиме с точностью гйба $\pm 0,1^\circ$. Предназначен для труб диаметром до 50 мм. Возможно доукомплектация станка манипулятором для автоматической подачи труб из приемного лотка в рабочую зону. Размер обрабатываемой стальной трубы $10 \times 1,2 \text{ мм}$, из коррозионностойкой стали — $38 \times 2,2 \text{ мм}$. Точность поворота трубы вокруг своей оси $\pm 0,1^\circ$, точность подачи — $\pm 0,1 \text{ мм}$. Максимальный угол гйба 190 %.

Компактный полуавтоматический сварочный аппарат SMAPTIG M20 со ступенчатым регулированием рабочего напряжения 220 В. Установленная мощность 5,8 кВт, диаметр сварочной проволоки 0,6—1 мм. Габаритные размеры сварочного аппарата $830 \times 400 \times 615 \text{ мм}$, масса 42 кг. Предназначен для работы в автосервисах, монтажных и ремонтных работ, для мелкосерийного и серийного производства металлоконструкций. Аппарат может работать на открытом воздухе. Для защиты во время работы применяют CO_2 и его смеси.

Ручные сварочные клещи R-93-12-RA (RH) (рис. 6) для точечной сварки конструкций из тонкого стального листа и прутка в единичном и мелкосерийном производстве. Клещи имеют компактную конструкцию, их масса 10,5 кг, надежны в работе. Оснащены электронным управлением, механизмом регулирования сварочного усилия, водяным охлаждением тиристорной группы, трансформатора и хоботов.



Рис. 6. Ручные сварочные клещи R-93-12-RA (RH)

Питающее напряжение 380 В, максимальная сварочная мощность 9,6 кВт, ток короткого замыкания 7,1 кА. Габаритные размеры $85 \times 360 \times 215 \text{ мм}$.

Фирма TOSHIBA (Япония) представила различное высоковольтное вакуумное оборудование.

Многофункциональный трехфазный инвертор VF-A7 с питающим напряжением до 460 В. Оснащен стабилизационным блоком (при изменении входного напряжения стабилизируется выходное напряжение). Диапазон выходной частоты 0,01—400 Гц при точности поддержания до 0,01 %. Инвертор работает при $-10\text{--}50^\circ\text{C}$. Бессенсорное векторное и безвекторное управление скоростью, моментом и позиционированием осуществляются датчиком скорости.

Высоковольтный вакуумный выключатель VHA-6M20S (рис. 7) на напряжение 7,2 кВ, ток 1200 А и ток размыкания 20 кА. Не требуется дополнительная защита от перенапряжений. Конструкция силовых контактов в вакуумном прерывателе позволяет значительно снизить переходные токи и напряжения. Выключатель оснащен моторным взводом пружины. Монтажный блок выдвигного исполнения имеет встроенные защитные блокировки, исключающие несчастные случаи при эксплуатации. Гарантируемый эксплуатационный ресурс 10 000 рабочих циклов.

В рамках выставки была организована большая деловая программа, научно-практические конференции "Уплотнительная



Рис. 7. Высоковольтный вакуумный выключатель VHA-GM20S

техника и герметизация тепломеханического оборудования в промышленности и энергетике", "Эффективность и экологичность насосного оборудования", "Компрессорная техника и пневматика в газовой промышленности".

В это же время в КВЦ "Сокольники" проходил международный специализированный салон "Смазочные материалы—2006", где свою продукцию демонстрировали зарубежные и российские производители. Ниже приведено краткое описание некоторых экспонатов.

ОАО "Азовские смазки и масла" (Бердянск) представило различные смазочные материалы.

Моторное минеральное масло "Турбо 1" для дизельных и быстроходных бензиновых четырехтактных двигателей легковых и грузовых автомобилей, включая двигатели с катализатором и турбонаддувом. Масло надежно защищает двигатель от износа, обеспечивает легкий запуск двигателя. Сохраняет высокую производительность каталитического конвертора. Пакет присадок обеспечивает чистоту двигателя при высоких термической нагрузке и содержании вредных веществ в выхлопных газах.

Моторное минеральное масло M-15/4040 "Супер" для форсированных бензиновых и дизельных двигателей автомобилей отечественного и зарубежного производства. Масло универсальное, всесезонное, с улучшенными вязкостно-температурными характеристиками. Диапазон применения по температуре от -25 до 40°C .

Минеральное масло M-2042 (M-8Г2К) для дизельных двигателей, в том числе и с умеренным турбонаддувом, высокооборотных стационарных дизелей и дизель-генераторов, при эксплуатации которых образуются высокотемпературные отложения.

Смазка АЗМОЛ ЛСЦ-15 для смазывания шарниров и осей приводов акселераторов, рычагов выключения, шлицевых соединений, механизмов стеклоподъемников автомобилей, узлов трения промышленного оборудования, работающих при средних нагрузках и температуре до 140°C . В состав смазки входит оксид цинка.

Смазка ЦИАТИМ-203 для смазывания зубчатых, червячных передач редукторов, подшипников скольжения и качения, различных силовых приводов, винтовых пар, механизмов, эксплуатируемых на открытых площадках, узлов трения. Смазка работоспособна при $-50\text{--}90^\circ\text{C}$.

Смазка ЦИАТИМ-221 для смазывания узлов трения и сопряженных поверхностей "металл—металл" и "металл—резина", работающих при $-60\text{--}150^\circ\text{C}$ (подшипники качения электромашин, системы управления и приборы, агрегатные подшипники).

Смазка ЦИАТИМ-201 для узлов трения, работающих с малым усилием сдвига при небольших нагрузках, электромеханических и других приборов, а также точных механизмов некоторых машин, работающих на Крайнем Севере, основных узлов автомобильной и другой техники, экс-

платацируемой в северных районах. Такая смазка работоспособна при -60 — 90 °С.

Смазка *ЦИАТИМ-205* для предотвращения спекания неподвижных резьбовых соединений и уплотнений, соприкасающихся с агрессивными средами. Работает при -60 — 50 °С; в подвижных резьбовых соединениях. Минимальная температура применения смазки -20 °С.

Смазка *"Пушечная" (ПВК)* для защиты от коррозии поверхностей металлических изделий из черных и цветных металлов при -50 — 50 °С.

Масляная *СОЖ МР-2У* для обработки резанием цветных металлов и сплавов, а также конструкционных углеродистых сталей на станках-автоматах и на отдельных операциях точения, фрезерования, шли-

фования. Используется одновременно в качестве СОЖ, смазочной среды для узлов трения и рабочей жидкости гидросистем станков.

Масляная *СОЖ МР-3* для обработки резанием конструкционных, легированных и коррозионно-стойких сталей на операциях сверления, глубокого сверления отверстий диаметром до 30 мм, растачивания, резьбо- и зубошлифования.

Масляная *СОЖ МР-6* для обработки резанием коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, титановых сплавов и тугоплавких материалов на операциях нарезания резьб, сверления, развертывания и протягивания.

Масляная *СОЖ МР-11* для обработки при тяжелых режимах резания различных

сталей и сплавов на операциях резбонарезания, зубообработки, точения, сверления.

Масляная *СОЖ МР-12*, применяемая при низких скоростях лезвийной обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Смазочно-охлаждающее технологическое средство *ТМ-ЛЕМНА*, применяемое на операциях холодной листовой и объемной штамповки сталей: чистовой вырубки, глубокой вытяжки, калибровки, прошивки на прессах-автоматах и формовки, а также при резбонакатке и резбонарезании.

В рамках выставки была организована Международная научно-техническая конференция "Вопросы производства и применения смазочных материалов".

А. Н. Иванов, инж.

4-я Международная специализированная выставка "Робототехника—2006"

Робототехника — одно из важнейших направлений науки и техники, определяющее дальнейшее развитие экономики России, качество и конкурентоспособность продукции, экологическую безопасность и технологическую независимость. В настоящее время роботы применяются практически во всех сферах человеческой деятельности, начиная от выполнения сложных операций в экстремальных условиях (разминирование радиационная разведка, космические роботы-манипуляторы и др.), решения специальных технологических задач для различных отраслей промышленности до "потребительских" робототехнических устройств (роботы-игрушки, роботы-футболисты и др.).

17—20 октября 2006 г. в Москве на ВВЦ прошла 4-я Международная специализированная выставка "Робототехника—2006", организованная Министерством образования и науки РФ, Министерством РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС), Федеральным агентством по науке и инновациям, Деловым советом Среднеатлантических штатов Америки и России, Русской выставочной компанией "Эксподизайн".

На 36 стендах выставки разместились экспозиции около 80 участников из России (в основном), а также Украины, Казахстана, Германии и Японии.

В экспозиции выставки были представлены новые разработки и оборудование ведущих профильных компаний, фирм и научных организаций по следующим основным направлениям:

— робототехника и мехатроника (промышленные робототехнические системы, роботы промышленного и специального назначения, интеллектуальные роботы и др.);

— встраиваемые и специализированные вычислительные системы (сис-

темы управления и контроля, системы технического зрения, программное обеспечение и др.);

— интеллектуальные "потребительские" робототехнические устройства (роботы-игрушки, роботы-футболисты, роботы-андроиды и др.).

Ниже приведены организации-участники и их новые разработки, представленные на выставке в соответствии с ее основными направлениями.

Совместное российско-немецкое предприятие ООО "Кука—ВАЗ Инжиниринг" (Тольятти) — гибкие робототехнические комплексы, автоматические линии сварки, резки, сборки, загрузки и выгрузки, промышленные роботы грузоподъемностью от 3 до 570 кг.

Предприятие также оказывает помощь в разработке технических заданий, осуществляет гарантированное и послегарантированное сервисное обслуживание и поставку запасных частей.

Компания КУКА (Германия):

— широкий спектр робототехнической продукции (консольные роботы, роботы-палетуукладчики, большегрузные роботы грузоподъемностью от 360 до 570 кг, межпрессовые системы и др.), многофункциональность и гибкость применения которой обеспечивается за счет напольного или потолочного монтажа;

— роботы нового типа для литейного и кузнечного производства (литья под давлением, в кокиль и песок, ковки), полимерной промышленности (бамперы и боковая обшивка автомобилей, корпуса для компьютеров, упаковка и др.), пищевой промышленности (переработки, укладки на палеты, транспортировки, выгрузки) (рис. 1).

Специальные программы моделирования и управления "КУКА" позволяют оптимизировать весь технологический процесс с учетом быстрого программирования.



Рис. 1. Шестиосевой промышленный робот нового поколения фирмы КУКА

ГНЦ РФ ЦНИИ робототехники и технической кибернетики (Санкт-Петербург):

— универсальный технологический шестизвенный манипулятор с возможностью наращивания числа звеньев с системой технического зрения. Число степеней свободы — 6, масса — 55 кг, тип шарниров — электромеханический, пульт оператора на базе ЭВМ. Предназначен для выполнения специальных технологических операций (сборки, стыковки, транспортировки, осмотра объектов и т. д.) в экстремальных условиях, в т. ч. в космосе;

— роботы серии РТК-03 и РТК-05 для поиска и эвакуации локальных источников гамма-излучения. В состав РТК входит дистанционно управляемое транспортное средство, оснащенное манипулятором и комплексом приборов радиационной раз-

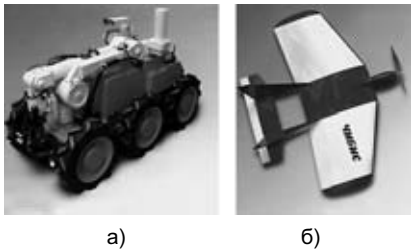


Рис. 2. Робототехнологический мобильный комплекс нового поколения РТК-05 (а) и мини-самолет "Чибис" для воздушного мониторинга окружающей среды (б)

ведки, и переносной пульт управления. Масса снаряженного транспортного средства 150 кг, дальность радиоуправления от 100 м (в помещениях) до 500 м (на открытой местности) (рис. 2, а);

— комплекс воздушного мониторинга окружающей среды, в состав которого входит микросамолет со средствами наблюдения, пульт управления и наземный пост обработки информации (рис. 2, б). Область применения: природопользование, транспортная инфраструктура, чрезвычайные ситуации, контроль государственной границы, антитерроризм и др.

ЗАО "Инженерный центр пожарной робототехники "ЭФЭР" (Карелия, Петрозаводск):

— пожарные роботы для борьбы с огнем с использованием мощного заряда распыленной массы воды или пены. Защищаемая площадь от 5000 до 15 000 м². В настоящее время широко применяют пожарные роботы на базе лафетных стволов с дистанционным управлением. Пожарные роботы нового поколения оснащены техническим зрением для наблюде-

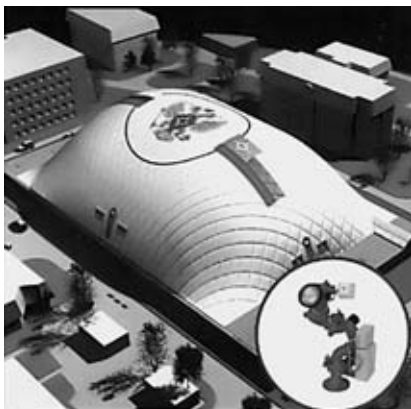


Рис. 3. Установка автоматического пожаротушения на базе роботизированного пожарного комплекса для защиты воздухоопорных сооружений площадью 7000 м²



ния за всей защищаемой зоной и точного наведения на очаг возгорания;

— роботизированные пожарные комплексы с автоматической установкой пожаротушения и защиты воздухоопорных сооружений площадью 7000 м², а также для защиты ангара для самолетов (рис. 3);

— сторожевые охранно-пожарные роботы "Дозор-3" для охраны и защиты объектов от проникновения посторонних, сигнализации о пожаре и пожаротушения, освещения территории и сервисных услуг. Могут входить в состав роботизированных сторожевых комплексов. Радиус наблюдения и защиты до 40 м, защищаемая площадь 5000 м², высота вышки-гидроколонны до 3 м.

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, ООО "Индэл-Партнер" (Москва) — телеуправляемые подводные аппараты семейства "ГНОМ": ГНОМ-стандарт — универсальный аппарат для выполнения разнообразных подводно-осмотровых работ, новый аппарат "Супер ГНОМ", оснащенный гидролокатором кругового обзора и манипулятором. Способен работать на глубинах до 300 м, компактный и достаточно прост в обращении. Предназначен для широкого круга пользователей. Максимальная рабочая глубина до 50 м, общая масса системы 11 кг (рис. 4).

ООО "Роботэк" (Нижний Новгород) — высоконадежные роботизированные гальванические линии (РГЛ) нового поколения с программным управлением. Экологичны, обеспечивают технологическую гибкость и высокую производительность процесса.

Грузоподъемность транспортных роботов консольного типа РГЛ 50 и 150 кг, конструкция линий — напольная, гальванические ванны — полипропиленовые или полиэтиленовые (рис. 5).



Рис. 4. Новый аппарат "Супер ГНОМ" для выполнения подводно-осмотровых работ на глубинах до 300 м



Рис. 5. Новое поколение РГЛ с программным обеспечением

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Научный-учебный центр "Робототехника", СКББ прикладной робототехники (Москва):

— мобильный робот LUCIAS — автономное устройство, снабженное бинокулярной системой технического зрения, бортовым компьютером для обработки информации, формирования в реальном масштабе времени программы движения в зависимости от текущей ситуации и поставленных целей и управления приводами колес подвижной платформы. На борту робота размещены также источники питания и средства связи с оператором по радиоканалу. Робот представляет собой базовый модуль, который может быть оснащен специальными датчиками и манипуляторами в зависимости от сферы применения, в т. ч. для охраны территорий, контроля параметров окружающей среды, работы в экстремальных условиях;

— мобильный робототехнический комплекс МРК-35МА нового поколения для прокладки кабеля, проведения погрузочно-разгрузочных работ, транспортирования предметов, эксплуатации в помещениях ограниченного объема и др.

Техническая характеристика: масса 325 кг, технологическая скорость до 0,2 м/с, преодолеваемый подъем — лестничный марш с углом наклона 35°, преодолеваемое препятствие — 0,5 м, разворот на месте. Имеет пять степеней подвижности грузоподъемностью 20 кг, пульт дистанционного управления, четыре цветные телекамеры.

Особенности: четырехгусеничное шасси с изменяемой геометрией и модуль гусеничного движителя изменяемой конфигурации, что обеспечивает мобильность и многофункциональность робототехнического комплекса.

Компания MITSUBISHI ELECTRIC (Япония) — промышленные роботы под торговой маркой "MELFA" грузоподъемностью от 1 до 12 кг. Типовое применение роботов — использование их в качестве манипуляторов в составе технологического оборудования при погрузочно-разгрузочных технологических операциях, а также в научно-исследовательских центрах, лабораториях и др. (рис. 6).



Рис. 6. Промышленный робот "MELFA" компании MITSUBISHI ELECTRIC

Основные технические характеристики роботов: четыре—шесть степеней свободы для широкого спектра применения, большой радиус действия, управление от ПК или ПЛК в режиме реального времени, многофункциональная операционная система.

На выставке достаточно широко были представлены экспозиции академических институтов, отраслевых НИИ, вузов (всего 21).

Среди них такие известные научные организации, постоянные участники подобных выставок, как Институт проблем механики РАН, Институт проблем лазерных и информационных технологий (ИПЛИТ) РАН, Институт проблем управления (ИПУ) РАН, ФГУ РНЦ "Курчатовский институт", ГНЦ РФ ФГУП "Институт физики высоких энергий", НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Ижевский государственный технический университет (ИжГТУ), Таганрогский государственный радиотехнический университет (ТГРУ) и др.

Определенный интерес представили новые разработки следующих научных организаций.

Курский государственный технический университет:

— мобильный робот Explorer с блоком управления Cyber-Vox для передвижения по плоским поверхностям (с любым углом наклона к горизонту). Используется для работ в экстремальных условиях, а также в качестве лабораторного стенда для студентов;

— мобильный двухсекционный робот для перемещения по вертикальным поверхностям (с углом наклона к горизонту от 0 до 9°). Двухсекционная конструкция робота позволяет повысить надежность закрепления (при помощи присосок) тела робота на наклонных поверхностях;

— мобильный ползающий робот X-SNAKE для перемещения по горизонтальной или наклонной плоскостям под углом до 15° по принципу движения змеи. Движение осуществляется при помощи персональной ЭВМ и модулей управления реверсивными двигателями постоянного тока с ременной передачей (рис. 7).

Уфимский научный центр Института механики РАН — уникальные конструкции микросхватов и инструментов, а также прототипы микроробототехнических схем (мобильные микросборочные роботы, пьезоэлектрический микроманипулятор). Разработки защищены 15 патентами.

Ростовский государственный университет, НИИ нейрокибернетики им. А. Б. Когана:

— разработки биологически мотивированных систем восприятия внешнего мира (активное зрение и многокомпонентное силовое очувствление роботов, управление поведением робота в условиях неопределенности внешней среды и др.);

— элементы очувствления (многокомпонентные датчики для робототехники, датчики сило-координатных платформ, первичные преобразователи динамометров, датчики крутящего момента);

— зрение роботов (базовая разработка визуального сенсора с параллельной обработкой информации);

— комплексные проекты (сило-координатный стол в системе целеуказания робота при решении задач сортировки, сборочный узел с многокомпонентными силовым очувствлением для силового контроля и организации податливости в процессе сборки, аппарат Илизарова с элементами силового контроля жесткости фиксации костей и управляемой компрессией (сжатием) костных обломков).

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины (Киев) — интеллектуальная компьютерная технология управления целенаправленными действиями мобильного робота с соответствующим программным обеспечением.

Компания SCHUNK (Германия) — системы захвата (пневматические, гидрав-



Рис. 8. Элемент системы захвата фирмы SCHUNK

лические, электрические) различного назначения, системы линейных манипуляторов серии LIRAX, комплектующие для роботов (легкосменные модули, датчики силы и мощности, системы защиты от перегрузок, системы корректировки, модули вращения) и др. (рис. 8).

Фирма BALLUFF (Германия) — индуктивные, оптоэлектронные, электро-механические сенсоры магнитного поля и др., преобразователи линейных перемещений, электронные программируемые компоненты автоматизации для различных отраслей промышленности (машиностроения, металлургии, автомобильной, деревообрабатывающей, химической промышленности и др.).

Как всегда, особенно многолюдно было у стендов, где были представлены интеллектуальные "потребительские" робототехнические устройства:

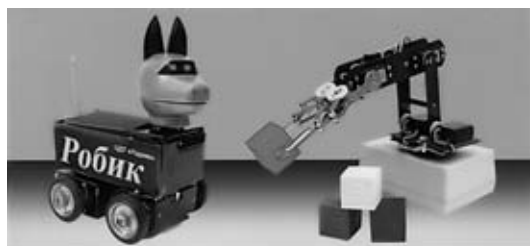
— роботы-игрушки: робот-собачка "Робик", мобильная платформа "Crazy Mouse", манипулятор с пятью степенями свободы ARM-5 (Объединение робототехники и технического конструирования "Робикон" Центра детского творчества "Родник", Орехово-Зуево Московской обл.);

— уникальные куклы-роботы. Внутри это программируемые роботы, снаружи — "живые" персонажи. Лица и руки выполнены из сибирского кедра. Кукла одета в разнообразные костюмы, может разговаривать, совершать определенные действия, иметь сходство с любым известным прототипом (ООО "Аниматроник", Томск);

— "обучающие" модели андроидных роботов — человекоподобные роботы, которые могут вести себя как "живой", т. е. могут взаимодействовать с владельцем и окружающей средой с системой программно-технических средств управления (ЗАО "Андроидные роботы", Москва).



Рис. 7. Мобильный ползающий робот "X-SNAKE"



а)



б)



в)

Рис. 9. Интеллектуальные потребительские роботы: а — робот-собачка "Робик"; б — андроидный робот; в — уникальные куклы-роботы



Рис. 10. Бои роботов с участием бойцового робота ARMADILLO, победителя 1-го чемпионата России по боям роботов

Следует отметить **компанию "Техновижн"** (Москва) — организатора таких мероприятий в рамках выставки "Робототехника—2006", как олимпиада роботов, соревнования программистов мобильных систем, бои роботов, футбол роботов и др., а также **"Объединенный робототехнический клуб"** (Москва) — некоммерческое партнерство по содействию развитию отечественной робототехники. Клуб основан в августе 2006 г. Принимает активное участие в научно-технических и обра-

зовательных проектах в области робототехники и мехатроники, в т. ч. в молодежных соревнованиях роботов EUROBOT в Италии.

Отдельные модели интеллектуальных мобильных роботов приведены на рис. 9, а бои роботов — на рис. 10.

В рамках выставки "Робототехника—2006" состоялась обширная научная и деловая программа, включающая цикл научных и практических конференций: "Микроробототехника", "Развитие и при-

менение робототехнических и интеллектуальных систем в современном обществе" (Сенсорные системы роботов), "Промышленность. Наука. Образование" (Подготовка научных и инженерных кадров, построение учебных и исследовательских робототехнических систем), практическую конференцию разработчиков программного оборудования для мобильных систем, семинары, презентации и конкурсы по различным номинациям.

А. А. Сулов, канд. техн. наук

Издательский центр "Технология машиностроения"

127018, Москва, ул. Октябрьская, 35

Сдано в набор 30.11.2006. Подписано в печать 11.01.2007. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 13,58. Заказ 02/07.

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"